



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

MĚŘENÍ A ANALÝZA VIBRACÍ TURBODMYCHADEL

MEASURING AND ANALYSIS OF TURBOCHARGERS VIBRATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

VOJTĚCH KUCHAR

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR KREJČÍ, Ph.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Vojtěch Kuchař

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906R001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Měření a analýza vibrací turbodmychadel

v anglickém jazyce:

Measuring and analysis of turbochargers vibration

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tématem práce je měření vibrací turbodmychadel zahrnující proces přípravy měření (kalibrace a instalaci snímačů). Téma je orientováno na vytvoření programu v prostředí LabVIEW pro sběr, vizualizaci a analýzu dat měřených při laboratorních testech turbodmychadel.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je vytvořit funkční program v prostředí LabView pro laboratorní testy turbodmychadel.

Seznam odborné literatury:

1. Elements of Vibration Analysis, Second Edition, McGraw-Hill Book Company, New York (Seventh Printing, 1994)
2. LabVIEW Measurements Manual, National Instruments, April 2003 Edition, Part Number 322661B-01, dostupné z www.ni.com

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Krejčí, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 16.11.2011

L.S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

Abstrakt

Tato práce se zabývá měřením a analýzou vibrací turbodmychadel, což zahrnuje popis vzniku těchto vibrací, dále proces přípravy měření (kalibrace snímačů a jejich instalace), tvorbu testovacího programu v prostředí LabVIEW a také následnou analýzu naměřených dat.

Klíčová slova

Turbodmychadlo, měření, LabVIEW

Abstract

This thesis describes measurement and analysis of turbochargers vibrations including vibrations origin, test preparation (sensors calibration and installation), creation of measurement application in LabVIEW and post-test data analysis.

Keywords

Turbocharger, measuring, LabVIEW

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUCHAŘ, V. Měření a analýza vibrací turbodmychadel. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 40 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Krejčí, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Měření a analýza vibrací turbodmychadel“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

25. května 2012

.....
Vojtěch Kuchař

Poděkování

Děkuji tímto vedoucímu práce Ing. Petr Krejčímu, Ph.D. a dále Ing. Tomáši Fryščokovi za cenné rady v průběhu tvorby této práce.

Obsah

| | |
|--|-----------|
| 1. ÚVOD | 10 |
| 2. POPIS PROBLÉMU | 11 |
| 2.1. Popis činnosti a konstrukce turbodmychadla | 11 |
| 2.1.1. Funkce a konstrukce..... | 11 |
| 2.1.2. Regulace obtokovým ventilem..... | 13 |
| 2.1.3. Regulace natočením lopatek, tzv. VNT | 13 |
| 2.1.4. Aktuátory regulace | 13 |
| 2.2. Vibrace spalovacího motoru | 14 |
| 2.3. Vibrace turbodmychadla | 15 |
| 2.4. Měření vibrací turbodmychadel..... | 16 |
| 2.4.1. Laboratorní testy vibrací | 16 |
| 2.4.2. Parametry použitých snímačů | 17 |
| 2.4.3. Připevnění snímačů k měřenému vzorku | 17 |
| 2.5. Frekvenční analýza..... | 18 |
| 2.5.1. Váhování oknem v časové oblasti..... | 18 |
| 2.5.2. Průměrování | 20 |
| 3. TVORBA MĚŘÍČÍHO PROGRAMU | 21 |
| 3.1. Zvolená platforma | 21 |
| 3.1.1. NI PXI..... | 21 |
| 3.1.2. LabVIEW | 23 |
| 3.2. Základní stavba programu | 24 |
| 3.2.1. Inicializace | 24 |
| 3.2.2. Nastavení připojených snímačů | 25 |
| 3.2.3. Kalibrace snímače | 27 |
| 3.2.4. Nastavení testu | 28 |
| 3.2.5. Měření a zobrazení dat uživateli | 29 |
| 3.2.6. Ukládání dat | 30 |
| 4. ANALÝZA NAMĚŘENÝCH DAT | 32 |
| 4.1. Realizace v programu..... | 32 |
| 4.2. Výpočet frekvenčního spektra..... | 32 |

| | | |
|------|--|----|
| 4.3. | Uložení výsledků do MS Excel..... | 33 |
| 5. | ZÁVĚR | 35 |
| 6. | POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE..... | 36 |
| 7. | SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ | 38 |
| 8. | SEZNAM PŘÍLOH..... | 39 |
| 9. | SAMOSTATNÉ PŘÍLOHY | 40 |

1. ÚVOD

Přeplňování motoru turbodmychadlem ušlo za posledních 50 let užívání dlouhou cestu, kdy z původně čistě závodního prostředí přešlo do každodenního provozu, kde se zvyšováním pohotovostní hmotnosti vozidel rostou požadavky na vysoký výkon a naopak rostoucí ceny pohonných hmot tlačí spotřebu paliva na minimum. Celosvětový trend tzv. downsizingu, kdy vysokoobjemové motory nahrazují menší motory s jednoduchým nebo vícestupňovým přeplňováním jasně ukazuje cestu, kterou se bude automobilový průmysl dále ubírat.

S rostoucími nároky na dynamiku jízdy, efektivitu pohonu a ekologickou bilanci rostou také nároky na samotné turbodmychadlo. Jako hlavní oblasti pokroku můžeme označit vývoj nových materiálů přinášející vyšší životnost, aerodynamický design poskytující vyšší výkon a jeho optimalizovaný průběh, přesnější uložení rotující soustavy, které dovoluje vyšší rychlosti otáčení (až 300 000ot/min u osobních automobilů) a v neposlední řadě i regulaci turbodmychadla, kdy řidič nepociťuje žádný „turboefekt“ a má dostatek výkonu v celém pracovním rozsahu otáček motoru. Všechny tyto požadavky kladou stále větší důraz na samotný vývoj turbodmychadla a také na laboratorní testování parametrů pro jeho celý životní cyklus.

Samotné testování probíhá ve specializovaných zařízeních, kde se obvykle nachází motor s turbodmychadlem připojený na dynamometr tvořící zátěž a měřicí a řídicí technika, která zpracovává data z nejrůznějších snímačů a podle požadavku operátora pak ovládá samotný motor. Mezi základní měřené veličiny patří teplota, tlak, průtok a otáčky částí turbodmychadla, ale můžeme zde najít např. i snímání ohybu lopatek, pohybu hřídele v ložiskách nebo měření vibrací.

Cílem této práce je tvorba programu pro laboratorní testy vibrací turbodmychadel pro osobní i nákladní automobily (průměr kompresorového kola od 32 do 130mm, cílový výkon motoru 40 až 660kW, benzínové i naftové aplikace) v prostředí LabVIEW. Toto měření slouží jednak k posouzení bezpečnosti instalace na daný motor a dále patří k základním možnostem posouzení stability ložiskového systému v celém rozsahu pracovních otáček. Tvorba programu probíhala v testovací laboratoři firmy Honeywell, kde se také vytvořený program bude dále používat pro testování.

2. POPIS PROBLÉMU

2.1. Popis činnosti a konstrukce turbodmyhadla

2.1.1. Funkce a konstrukce

Turbodmychadlo pracuje na principu využití ztrátové energie výfukových plynů k roztáčení turbínového kola, které je na společné hřídeli s kompresorovým kolem. To se stará o sání a kompresi vzduchu pro motor. Díky většímu obsahu vzduchu ve válci je pak možný vstřík větší dávky paliva a s tím souvisí i vyšší výkon motoru. Zároveň se poté rychleji roztočí turbínové kolo a celý děj je tak z části samoregulační, kdy při jízdě bez zátěže nebo na volnoběh se turbo jen pomalu otáčí a motor pracuje téměř v atmosférickém režimu, zatímco při sešlápnutí plynového pedálu a potřebě výkonu a naroste objem výfukových plynů, tím se turbo roztočí a zvýší objem nasávaného vzduchu. [2]

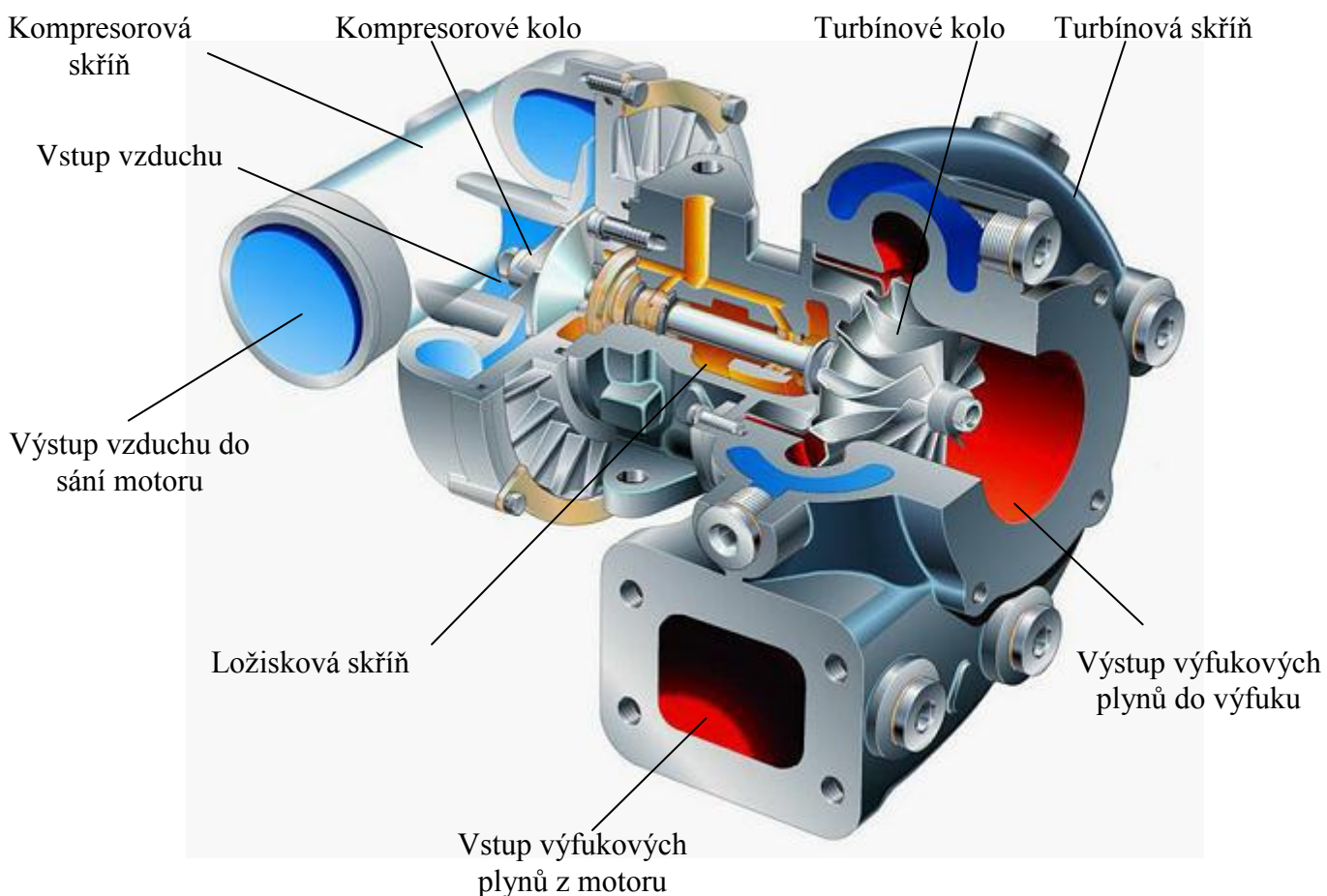
Schéma takového přepřívání lze vidět na Obr. 1.



Obr. 1. Schéma přepřívání turbodmychadlem, převzato z [3]

Popis jednotlivých částí turbodmyhadla můžeme nalézt na Obr. 2. Základním problémem při konstrukci je teplota výfukových plynů, kdy u naftového motoru může dosáhnout teplota před turbínovým kolem až 850°C a u benzínového motoru až 1000°C [4]. Když k tomu přičteme fakt, že se celá rotující část otáčí rychlostí až 300 000 ot/min a je požadován co nejmenší moment setrvačnosti pro rychlou odezvu, nezbyvá než použít drahé materiály a složitý výrobní proces. Samotná rotující soustava je uložena v ložiskové skříni, která bývá u větších turbodmychadel chlazená vodou z chladicího okruhu motoru. Ložiska se používají skoro výlučně kluzná, kdy jako mazivo slouží motorový olej, který zároveň částečně ochlazuje ložiskovou část. Kvůli vysoké ceně se zatím pouze v nejluxusnějším segmentu osobních aut a v motorsportu přechází na ložiska kuličková, která nabízejí nárůst mechanické účinnosti a zrychlení přechodové odezvy o 20 až 70%. [3], [5]

Díky vysoké teplotě na turbínové straně, která se částečně přenáší i na kompresorovou stranu a také stlačováním nasávaného vzduchu roste teplota na sání motoru, což zhoršuje účinnost spalovacího procesu. Proto se do systému často přidává mezichladič stlačeného vzduchu, tzv. intercooler. [3]



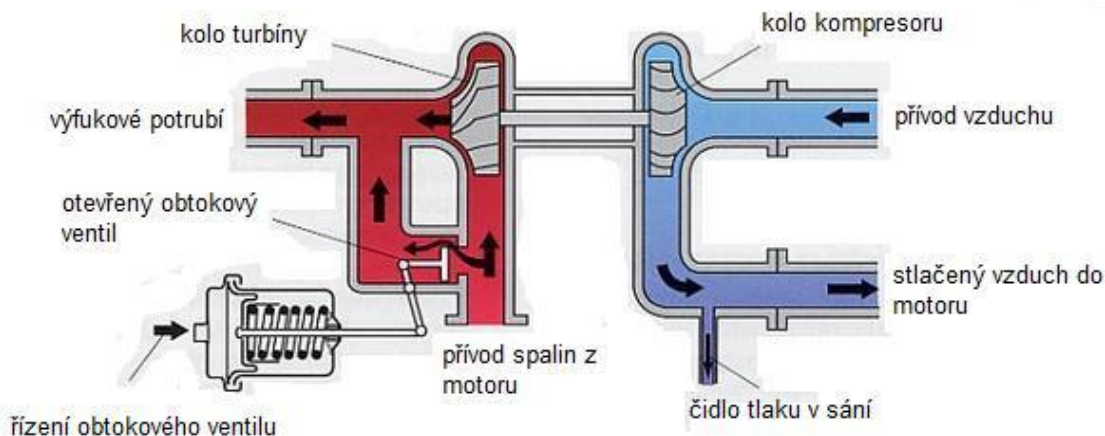
Obr. 2. Popis konstrukce turbodmyhadla, převzato z [3]

Jelikož je v každodenním provozu zapotřebí vysoký výkon v celém pracovním spektru motoru (různý průtok na turbínovém kole), je zapotřebí regulace plnicího tlaku. Toho lze docílit dvěma základními způsoby:

- Regulace obtokovým ventilem
- Regulace natočením lopatek, tzv. VNT (Variable Nozzle Turbine)

2.1.2. Regulace obtokovým ventilem

V tomto případě je ještě před turbínové kolo umístěn obtokový ventil (viz Obr. 3.), který ovládá přes aktuátor řídicí jednotka motoru nebo samotné turbodmychadlo. Při vyšších otáčkách motoru se ventil otevře a část spalín je přepuštěna rovnou do výfukového potrubí, přičemž je ochráněno samotné turbodmychadlo. Nevýhodou této regulace je, že turbodmychadlo poskytuje dostatek tlaku pouze v omezeném pracovním rozsahu motoru.[3]



Obr. 3. Obtokový ventil v turbodmychadle, převzato z [6]

2.1.3. Regulace natočením lopatek, tzv. VNT

Naproti tomu VNT regulace zlepšuje efektivitu celého turbodmychadla, neboť umožňuje plynulou změnu průtoku natáčením lopatek podle otáček motoru, viz Obr. 4.



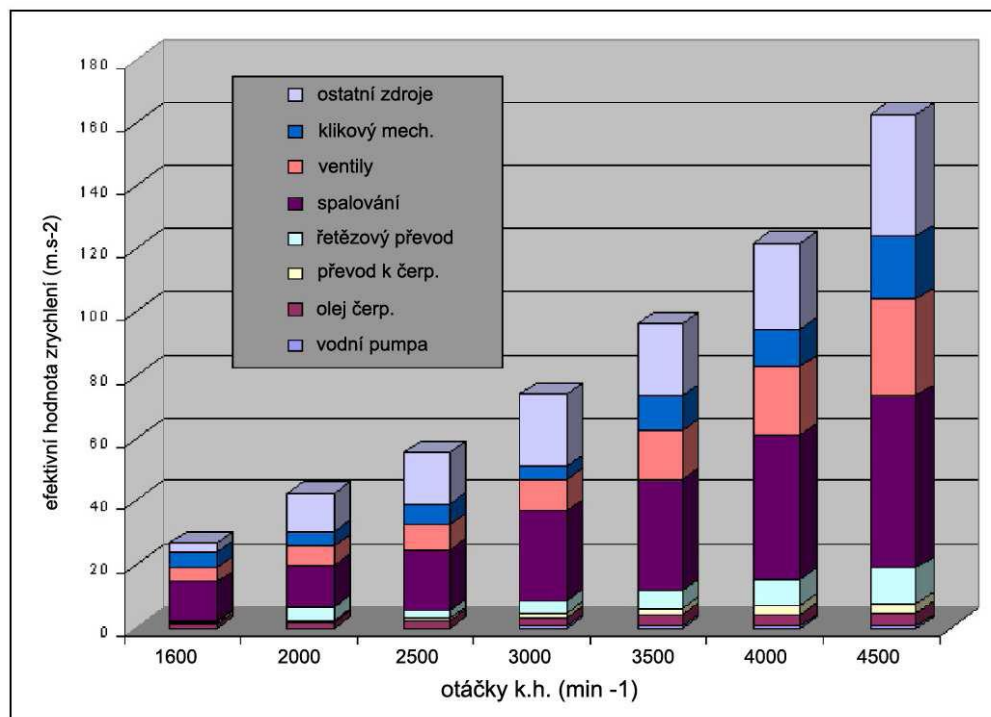
Obr. 4. Princip změny geometrie turbínové skříně, převzato z [6]

2.1.4. Aktuátory regulace

V obou případech je ovládání regulačního mechanismu řízeno aktuátorem, buďto jednoduchým pneumatickým, který reaguje na přetlak v turbínové skříně a tudíž je zcela autonomní (vhodné pro regulaci obtokovým ventilem), anebo složitější elektromechanickou soustavou s DC motorem, převodovým mechanismem a snímačem polohy. Tento aktuátor je poté řízen z řídicí jednotky motoru a umožňuje přesnější řízení (vhodné především pro VNT regulaci). [3]

2.2. Vibrace spalovacího motoru

Spalovací motor je složitá termo-mechanická soustava, která obsahuje mnoho zdrojů vibrací, jejichž přibližné zastoupení pro různé otáčky motoru lze vidět na Obr. 5.



Obr. 5. Porovnání zdrojů vibrací při maximálním zatížení zážehového motoru, převzato z [8]

Největší z nich způsobuje termodynamický cyklus spalování paliva, kdy je nasávaná směs vzduchu a paliva stlačována a posléze zapálena, což způsobí velký nárůst tlaku plynů ve válci. Frekvence těchto vibrací je přímo závislá na otáčkách (zážeh u běžných motorů nastane vždy jednou za otáčku motoru), můžeme tedy použít jednoduchou rovnici (1).

$$f = \frac{n}{60} \quad (1)$$

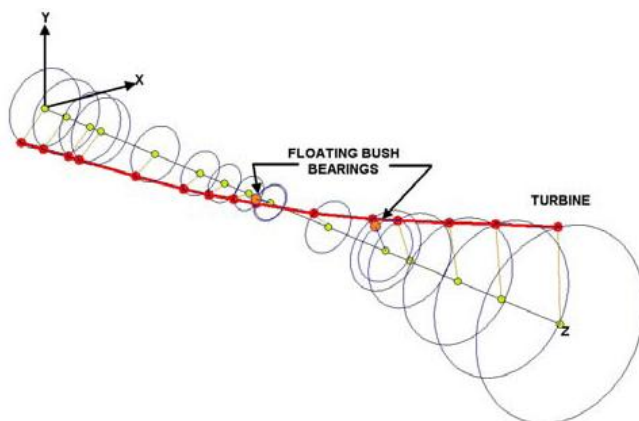
Kde n otáčky motoru [ot/min].

Následují vibrace způsobené pohybem ventilů, kam můžeme zařadit jejich zavírání (dosednutí do sedel), otevírání (vymezování vůle ventilového rozvodu) nebo tření vačky po kontaktní ploše zdvihátka ventilu. Jako další zdroje můžeme uvést například klikový mechanismus, řetězový převod nebo nerovnoměrnost chodu spalovacího motoru, kdy se střídají jednotlivé pracovní cykly. Všechny tyto vibrace se pohybují do frekvence přibližně 500 Hz a přenášejí se i na turbodmychadlo a tím mohou způsobit jeho poruchu. [8]

2.3. Vibrace turbodmychadla

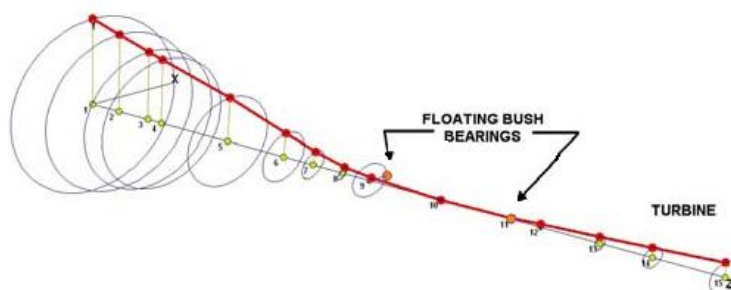
Zdrojem největších vibrací turbodmychadla je bezpochyby rotorová soustava. To je dáno jednak její vysokou rychlostí otáčení, dále velkými změnami teplot a tím pádem teplotní dilataci jednotlivých dílů a také způsobem uložení, kdy se nejčastěji používají kluzná ložiska, která nemají přímý kontakt. To klade jednak velké požadavky na kvalitu mazacího oleje (správné složení, kvalitní distribuce při všech motorových režimech, čistota) a také na kvalitu výroby těchto ložisek. Také rychlé vypnutí motoru po velké zátěži může způsobit „zapékání“ oleje ve žhavých ložiskách, které se postupně zanášejí a tím zvyšují tření a následně vibrace. Proto se doporučuje ponechat motor po velké zátěži běžet pár minut na volnoběh a tím docílit zchlazení oleje v ložiskách. [9]

Podle [10] se rotorová soustava může obvykle nacházet ve dvou stavech nestability. V prvním případě dochází ke kuželovému subsynchronnímu pohybu, kdy se turbínové a kompresorové kolo pohybují po kružnicích kolem rovnovážné polohy (Obr. 6.). Tento pohyb je nezávislý na rychlosti otáčení a nastává obvykle v celém otáčkovém spektru.



Obr. 6. Subsynchronní kuželový pohyb s dominantní turbínovou stranou, převzato z [10]

Naopak druhý stav nestability se objevuje až při vyšších otáčkách (40 000 ot/min a výše) a je na nich přímo závislý. Dochází k synchronnímu kuželovému pohybu s dominantní kompresorovou stranou (Obr. 7.). To způsobuje namáhání hřídele na ohyb a také větší namáhání kompresorového ložiska.



Obr. 7. Synchronní kuželový pohyb s dominantní kompresorovou stranou, převzato z [10]

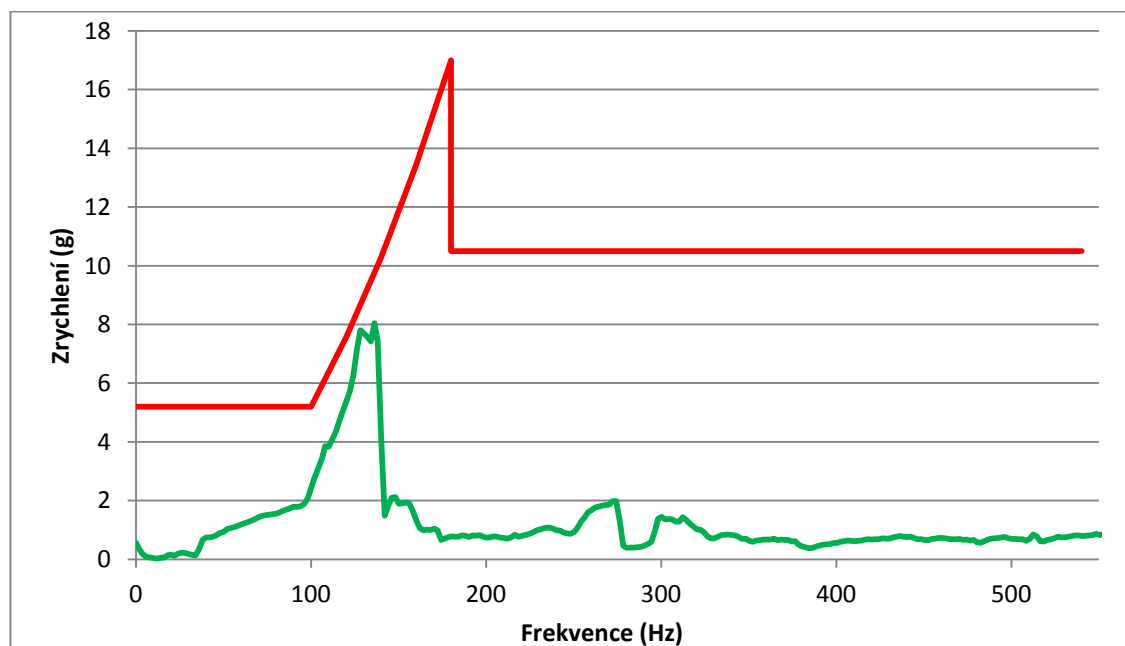
2.4. Měření vibrací turbodmychadel

2.4.1. Laboratorní testy vibrací

K laboratornímu měření vibrací jsou použity většinou tříosé, případně jednoosé akcelerometry umístěné na kompresorové a ložiskové skříni, těle aktuátoru a také na hlavě motoru. Toto umístění velmi záleží na provedení samotného turbodmychadla a také na účelech daného testu. Jelikož běžné akcelerometry mají omezený teplotní rozsah (typicky -50 až 120°C), je zapotřebí na toto dávat pozor a případně umístit k akcelerometrům ofuk studeného vzduchu. Samotný test se skládá ze 4 částí:

- motor bez zátěže, 60s rampa otáček od 1000 až po maximální
- motor bez zátěže, 60s rampa otáček od maximálních po 1000
- motor s plnou zátěží, 60s rampa otáček od 1000 až po maximální
- motor s plnou zátěží, 60s rampa otáček od maximálních po 1000

V tomto průběhu dochází k záznamu zrychlení ze snímačů a obvykle také rychlosti motoru a turbodmychadla. Data jsou následně zpracována s důrazem na hladinu jednotlivých složek frekvenčního spektra pro všechny operační režimy a porovnává s limity povolenými pro daný typ (Obr. 8.).

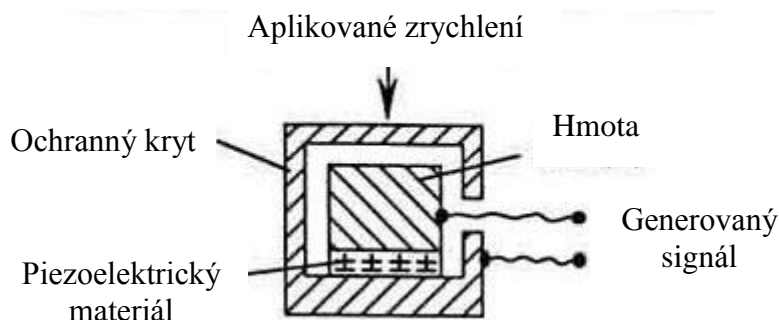


Obr. 8. Porovnání naměřeného frekvenčního spektra jedné osy s produkčním limitem

Kromě frekvenčního spektra se dále mohou vyhodnocovat například špičkové a RMS hodnoty v závislosti na otáčkách motoru, jednotlivé harmonické komponenty a jejich RMS hodnoty a další podle potřeby. Tyto analýzy probíhají ve specializovaných programech a nejsou předmětem této práce.

2.4.2. Parametry použitých snímačů

Jak již bylo uvedeno dříve, pro měření zrychlení jednotlivých částí turbodmychadla se používají tříosé akcelerometry fungující na piezoelektrickém principu. Ty obsahují piezoelektrický materiál, který při mechanickém namáhání (akcelerace snímače) vytváří elektrický náboj. Měření tohoto náboje je pak realizováno buď pomocí další elektroniky (nutnost vysoké vstupní impedance), nebo častěji snímač přímo obsahuje vnitřní elektroniku, která náboj konvertuje na napěťový výstup s nízkou impedancí. Kvůli tomu je potřeba zajistit napájení snímače zdrojem konstantního proudu (obvykle jednotky mA). [11]



Obr. 9. Blokové schéma principu piezoelektrického akcelerometru, převzato z [11]

Mezi základní parametry takovýchto akcelerometrů pak patří rozsah měření, citlivost (mV/g nebo $\text{mV/m}\cdot\text{s}^{-2}$), frekvenční a teplotní rozsah a také váha samotného snímače, neboť pro správné měření vibrací je zapotřebí dodržet pravidlo, že váha snímače musí být minimálně 10x menší než samotný měřený vzorek. [11]

Pro samotné měření byly použity snímače firmy Kistler (8763A500M5) a PCB (HT356B21 a M353B16). Shrnutí jejich vlastností můžeme vidět v Tab. 1.

| Výrobce | Kistler | PCB | PCB |
|--|------------|---|------------|
| Typ | 8763A500M5 | HT356B21 | M353B16 |
| Rozsah [g] | ± 500 | ± 500 | ± 500 |
| Citlivost [mV/g] | 10 | 10 | 10 |
| Frekvenční rozsah ($\pm 5\%$) [Hz] | 1...12 000 | 2...10 000 (osa y a z) 2...7 000 (osa x) | 1...10 000 |
| Teplotní rozsah [$^{\circ}\text{C}$] | -54...165 | -54...121 | -54...121 |
| Váha [g] | 3,3 | 3,97 | 1,42 |

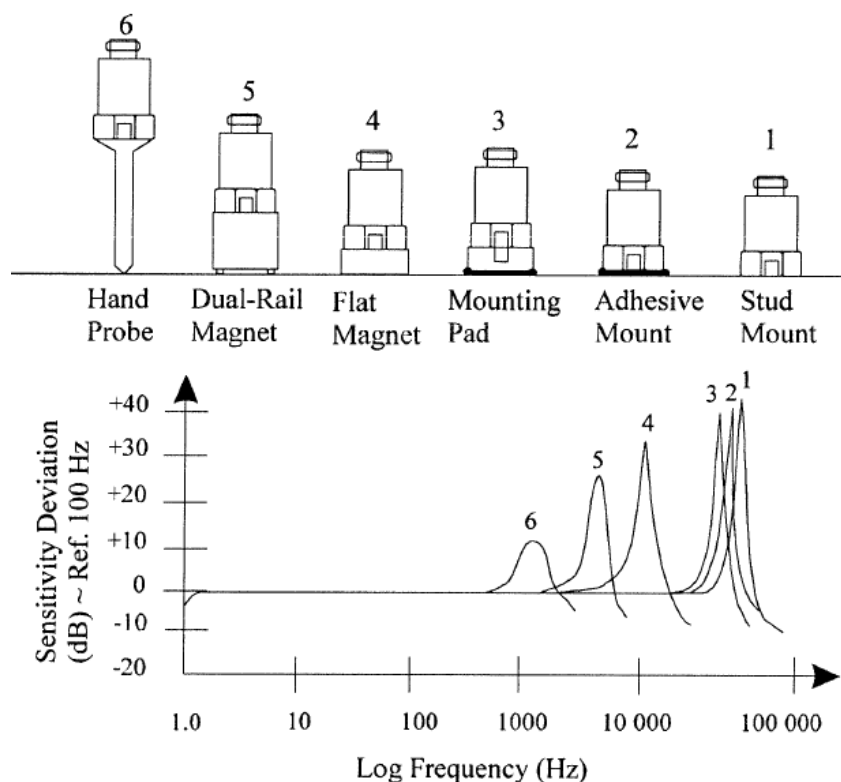
Tab. 1. Parametry použitých snímačů, převzato z [12],[13],[14]

2.4.3. Připevnění snímačů k měřenému vzorku

Správné upevnění snímačů k měřenému vzorku je velmi důležité, neboť jen tak lze považovat měřené zrychlení zejména ve vyšších frekvencích za věrohodné (způsob upevnění ovlivňuje citlivost upevněného snímače ve vyšších frekvencích a tím i použitelný pracovní frekvenční rozsah, viz Obr. 10.). V tomto směru je jednoznačně nejlepší metoda připevnění

pomocí šroubu (všechny výše uvedené akcelerometry na svém krytu obsahují šroubový závit). To v praxi naráží na problém s destrukcí vzorku, který je trvale znehodnocen. Proto se obvykle používá připevnění pomocí nejrůznějších lepidel. Pro jednodušší manipulaci se snímačem se dále používá tzv. základna, které obsahuje jednak rovný povrch pro nalepení na testovaný vzorek a jednak šroubový závit pro jednoduché připevnění snímače. [13]

Pro samotné měření bylo použito lepidlo Loctite 454, které nabízí velkou pevnost při zachování dobré rychlosti vyschnutí (několik sekund). Pro rychlejší přilnavost se navíc používá tzv. aktivátor Loctite 7471.



Obr. 10. Vliv upevnění na citlivost snímače ve vysokých frekvencích, převzato z [13]

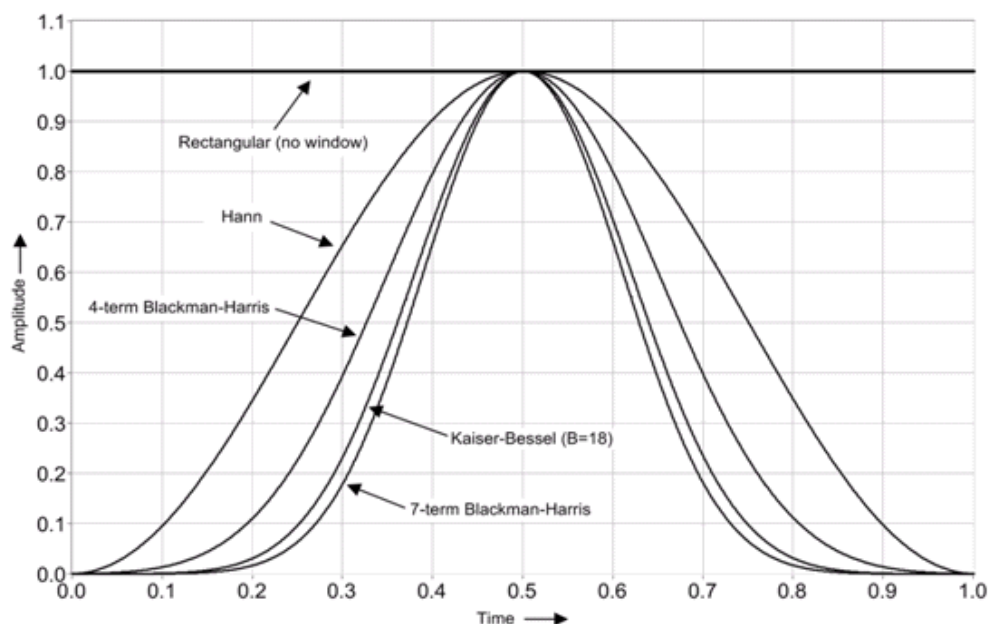
2.5.Frekvenční analýza

Jak již bylo napsáno dříve, k zhodnocení samotného testu slouží nalezení špičkových hodnot jednotlivých složek frekvenčního spektra a jejich porovnání s produkčním limitem. K převodu z diskretní časové oblasti do frekvenční slouží Fourierova transformace.

2.5.1. Váhování oknem v časové oblasti

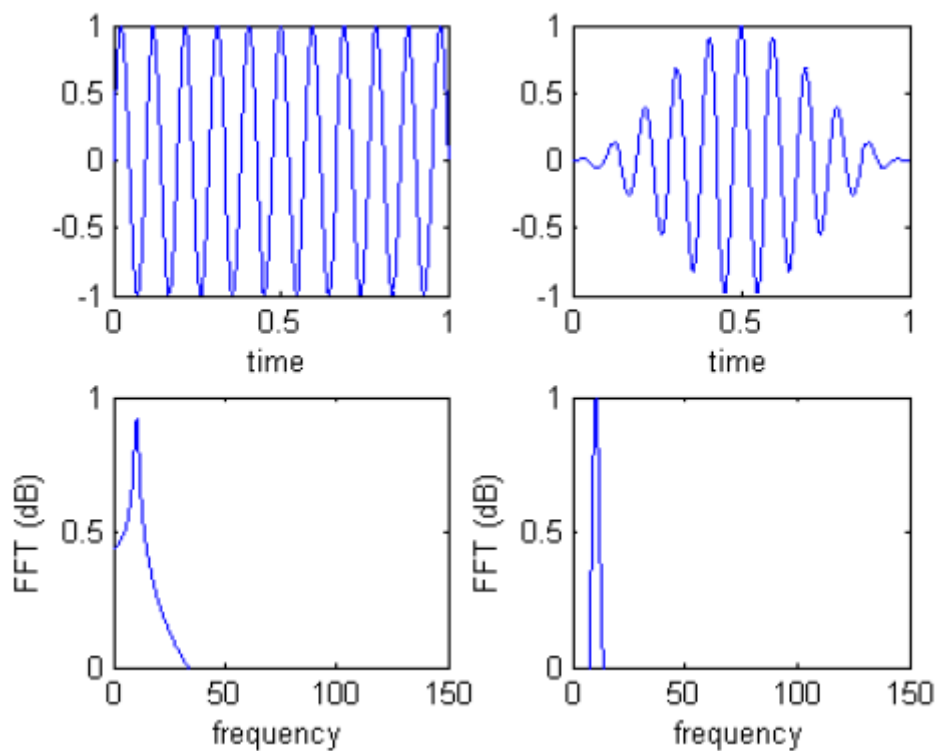
Jelikož je zdrojový signál rozdělen do diskretních částí, je pro správné výsledky Rychlé Fourierovy transformace vhodné použít váhování oknem v časové oblasti. To minimalizuje prosakování energie na frekvence, které se nenachází ve zdrojovém spektru a které by mohly zakrývat spektrum signálů s menší energií.

Velmi důležitý je samotný tvar okna, kdy je potřeba volit kompromis mezi potlačením prosakování (co nejméně ostré přechody) a frekvenčním rozlišením (co největší šířka hlavního oblouku). Těchto oken existuje velké množství (viz Obr. 11.), v praxi se nejvíce používá Hanningovo okno. [16]



Obr. 11. Nejčastější tvary časového okna, převzato z [15]

Jak lze vidět na Obr. 12, periodický sinusový signál ($f=10$ Hz) je díky rozdělení na jednotlivé časové okna nesouvislý, což způsobuje prosakování energie i na jiné frekvence (levá část obrázku). Po aplikaci Hanningova okna v časové oblasti (vpravo) je toto prosakování minimalizováno.



Obr. 12. Porovnání FFT analýzy bez použití okna (vlevo) a s Hanningovým oknem (vpravo), převzato z [17]

2.5.2. Průměrování

Jelikož výpočet frekvenčního spektra probíhá nespojitě a samotné vibrace jsou časově nestálý jev, je vhodné výsledky pro jednotlivá spektra dále průměrovat pro získání přesnějšího popisu měřeného vzorku. V praxi se používají 3 typy průměrování: lineární, exponenciální a tzv. peak hold. Lineární průměrování jednoduše sečte jednotlivé hodnoty pro každou frekvenci a podělí je počtem průměrování. Naproti tomu exponenciální průměrování upřednostňuje novější data podle vzorce (2). [18]

$$Y_i = X_i \cdot \frac{1}{p} + Y_{i-1} \cdot \frac{p-1}{p} \quad (2)$$

Kde Y_i ...nový průměr
 Y_{i-1} ...předchozí průměr
 X_i ...nově vypočítané spektrum
 p ...počet průměrování.

Peak hold ve skutečnosti není průměrováním v pravém slova smyslu (i když zde bývá zařazováno), neboť pro každou frekvenci spektra „udržuje“ nejvyšší hodnotu ze všech zvolených spekter. To pomáhá odhalit špičkové hodnoty jednotlivých frekvencí, které mohou být pro testovaný objekt kritické. [15]

Pro měření vibrací na turbodmychadle se jeví nejvhodnější právě peak hold s počtem průměrování nastaveným na 5 hodnot. Toto zajistí jednak odhalení špičkové hodnoty signálu přesahující limit, ale také „aktualitu“ zobrazeného spektra. Následná analýza naměřených dat také probíhá na principu Peak hold, jen pokrývá celou časovou oblast měření.

3. TVORBA MĚŘÍCIHO PROGRAMU

3.1. Zvolená platforma

Pro vlastní měření vibrací byla zvolena hardwarová platforma PXI společně s grafickým programováním v prostředí LabVIEW od společnosti National Instruments. Toto řešení poskytuje ucelenou soustavu pro sběr dat a tvorbu vlastních uživatelských prostředí, přičemž zachovává velkou variabilitu, rozšiřitelnost a krátký čas vývoje aplikací.

3.1.1. NI PXI

Samotný PXI systém se skládá ze šasi, které obsahuje zdroj napětí, chlazení a komunikační sběrnice pro připojení dalších modulů, dále z tzv. PXI kontroléru obsahujícího řízení celého systému (obsahující platformu Windows nebo vlastní systém reálného času NI LabVIEW Real-Time) a konektory pro spojení s periferiemi (monitor, klávesnice, myš...) a se sítí (ethernet). Poslední a nejdůležitější částí jsou měřicí karty, které se vkládají do slotů v šasi a dovolují tak uživateli sestavení jedinečné soustavy podle potřeby. Těchto měřicích karet existuje velké množství, od vstupně-výstupních karet (různý počet analogových a digitálních vstupů), přes komunikační karty (např. protokoly CAN, PROFIBUS, GPIB) až po například velmi rychlé karty s FPGA polem.

Pro měření vibrací byla zvolena karta NI PXI-4496, která je určena speciálně pro měření vibrací (případně i hluku za použití mikrofónů). Mezi základní vlastnosti karty patří:

- 16 simultánně vzorkovaných analogových vstupů
- maximální vzorkovací frekvence 204,8 kS/s
- 24 bitové rozlišení
- vnitřní paměť na 4095 vzorků
- programově nastavitelný zdroj proudu pro měření s akcelerometry
- nastavitelný antialiasingový filtr

Tato karta obsahuje dva 4X InfiniBand konektory, kde každý nese 8 vstupních kanálů (označených jako AI0-7 a AI8-15), na které jsou dále napojeny stíněné rozbočovače s osmi BNC konektory pro jednotlivé výstupy akcelerometrů a jeden triggerovací konektor pro případné automatické spouštění měření.



Obr. 13. Měřicí karta NI PXI-4496, převzato z [15]

Pro měření otáček motoru a turbodmychadla, případně dalších vibračních kanálů byla použita karta NI PXI-4472, která nabízí podobné vlastnosti, ale obsahuje pouze 8 kanálů a nabízí nižší vzorkovací frekvenci 102,4 kS/s, tím i nižší hodnotu vnitřní paměti (1023 vzorků). Posledním rozdílem jsou použité konektory, neboť na této kartě nalezneme přímo 9 SMB konektorů, 8 označených jako AI0-7 pro připojení zdrojů měřených signálů a opět jeden triggerovací konektor pro automatické spouštění měření.



Obr. 14. Měřicí karta NI PXI-4472, převzato z [15]

Jako zdroj informace o otáčkách motoru a turbodmychadla slouží externí zařízení (platforma PUMA Open pro motor a Microepsilon TurboSPEED pro turbodmychadlo), které obsahují napěťové výstupy, které jsou připojeny právě na kartu NI PXI-4472. Otáčky lze pak vypočítat pomocí vzorce (3) pro motor a (4) pro turbodmychadlo. Jelikož je nastaveno maximum při výstupu 10V, můžeme jednoduše určit maximální měřené otáčky pro motor (6000 ot/min) i pro turbodmychadlo (400 000 ot/min).

$$n_{motoru} = U \cdot 600 \quad (3)$$

$$n_{turbodmychadla} = U \cdot 40\,000 \quad (4)$$

| | | |
|-----|----------------------|---------------------------------|
| Kde | U | měřené napětí [V] |
| | n_{motoru} | otáčky motoru [ot/min] |
| | $n_{turbodmychadla}$ | otáčky turbodmychadla [ot/min]. |

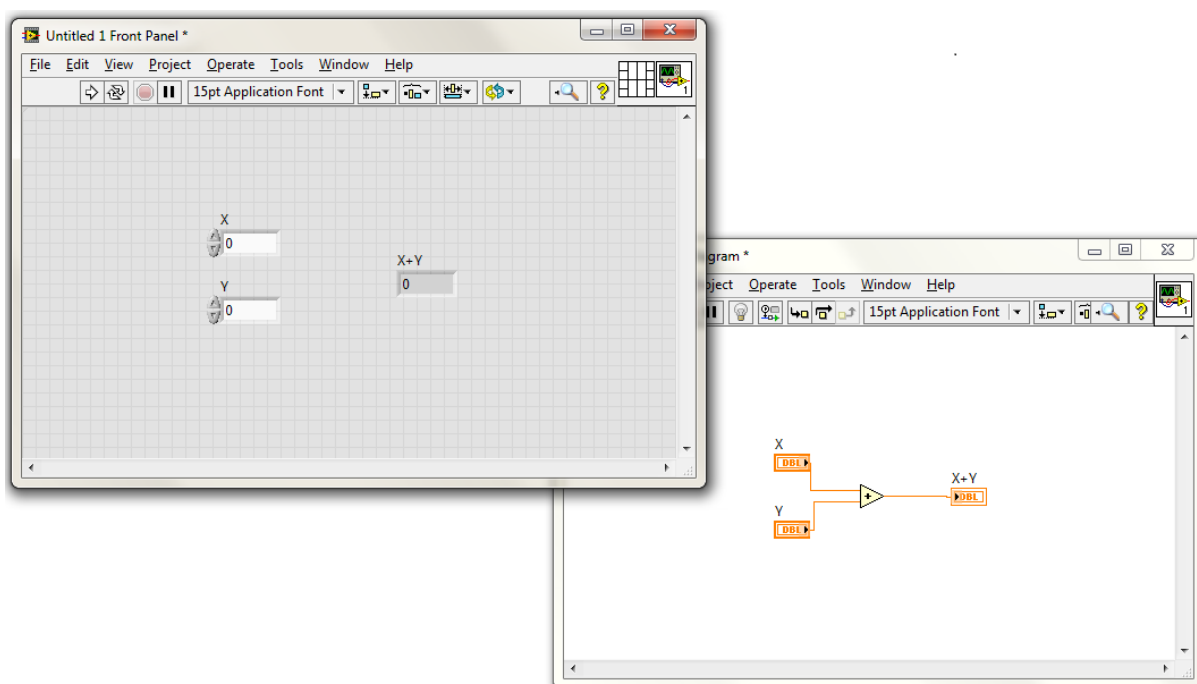


Obr. 15. Použitý PXI systém

3.1.2. LabVIEW

Tato programová platforma nabízí jednak možnost jednoduché tvorby vlastního uživatelského prostředí a jednak přináší výhody grafického programování, mezi něž patří zejména rychlost tvorby a přehlednost kódu a hlavně zpřístupnění programování pro širokou technickou veřejnost. Dále nesmíme zapomenout ani na přímé napojení na další produkty National Instruments, díky čemuž došlo ke zrychlení celého vývoje měřících a ovládacích systémů.

Celý proces tvorby takovýchto programů pak spočívá v jednoduchém přetahování grafických objektů (tlačítka, indikační diody, grafy, nápisy...) nebo funkcí (matematické, logické, fyzikální...) z knihoven na pracovní plochu. Zdroje dat, funkce a výstupy se pak spojí dráty reprezentující datový tok, přičemž je možné přidávat různé rozhodovací funkce (např. IF) nebo zahrnout část kódu do smyčky (např. FOR nebo WHILE) atd.



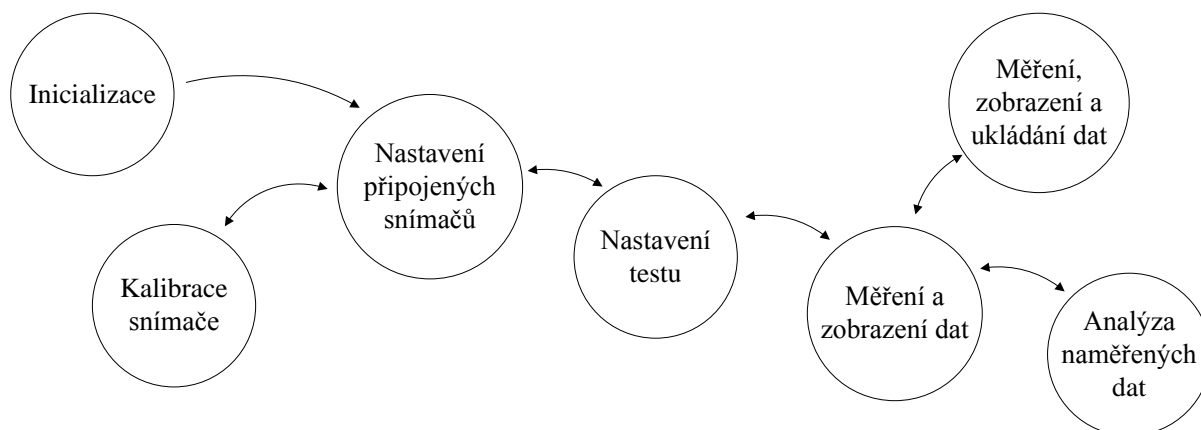
Obr. 16. Jednoduchý program v LabVIEW pro sčítání dvou čísel

Výsledný program je poté možné pomocí *Application Builderu* zkompileovat do jednoho spustitelného souboru (.exe), případně připravit celou instalaci. Pro běh takovýchto zkompileovaných programů je ovšem na každý cílový počítač potřeba nainstalovat ještě tzv. *Runtime environment*, případně jej je možné přidat do vytvořeného instalačního souboru. Možné je také program nahrát do nabízeného realtime kontroléru a následně jej nechat běžet automatizovaně bez zásahu uživatele.

Díky velmi dobré podpoře ze strany National Instruments, kdy přímo LabVIEW obsahuje několik desítek základních příkladů a další tisíce je možné nalézt na webových stránkách, bych tuto platformu doporučil jak naprostým začátečníkům, tak i pokročilým tvůrcům, neboť díky velkému množství funkcí a možnosti propojení není problém ani tvorba měřících nebo ovládacích programů se stovkami vstupů a výstupů, nebo se složitými a časově náročnými výpočty.

3.2. Základní stavba programu

Pro základní stavbu programu byla zvolena sekvence podle Obr. 17.



Obr. 17. Sekvence programu

Pro samotné provedení programu byla zvolena *Case Structure* ve spojení s *Tab Control*, které umožní různé uživatelské rozhraní pro nejdůležitější stavy („Nastavení připojených snímačů, Nastavení testu, Měření, zobrazení a ukládání dat a Analýza naměřených dat“), které představují 4 rozdílné obrazovky programu. O samotném přechodu mezi těmito stavy pak rozhoduje uživatel pomocí tlačítek *Next* a *Back* umístěných vždy ve spodní části obrazovky na pravé, respektive levé straně. Specifickým stavem je kalibrace snímače, který uživatel spouští tlačítkem *Calibrate* pro jeden daný snímač z obrazovky nastavení připojených snímačů. Tato akce zobrazí speciální okno kalibrace, které bude popsáno dále v této práci.

Pro ukončení programu slouží tlačítko *Exit program* v horní části uživatelského rozhraní. Program obsahuje ochranu proti nechtěnému vypnutí při měření a ukládání dat a výpočtu analýzy, v těchto případech tlačítko nereaguje a je potřeba ukončit ukládání, respektive počkat na dokončení analýzy dat.

3.2.1. Inicializace

Po spuštění programu proběhne inicializace, kde dojde k načtení všech výchozích hodnot ovládacích prvků, polí a grafů. Většina těchto prvků má přímou možnost uložení této implicitní hodnoty ve svém nastavení. Dále inicializace obsahuje informaci přechodu do následujícího kroku.

Tyto úkony provádí tzv. *Flat Sequence Structure*, která zajistí, aby další krok proběhl až po kompletním vykonání první části.

3.2.2. Nastavení připojených snímačů

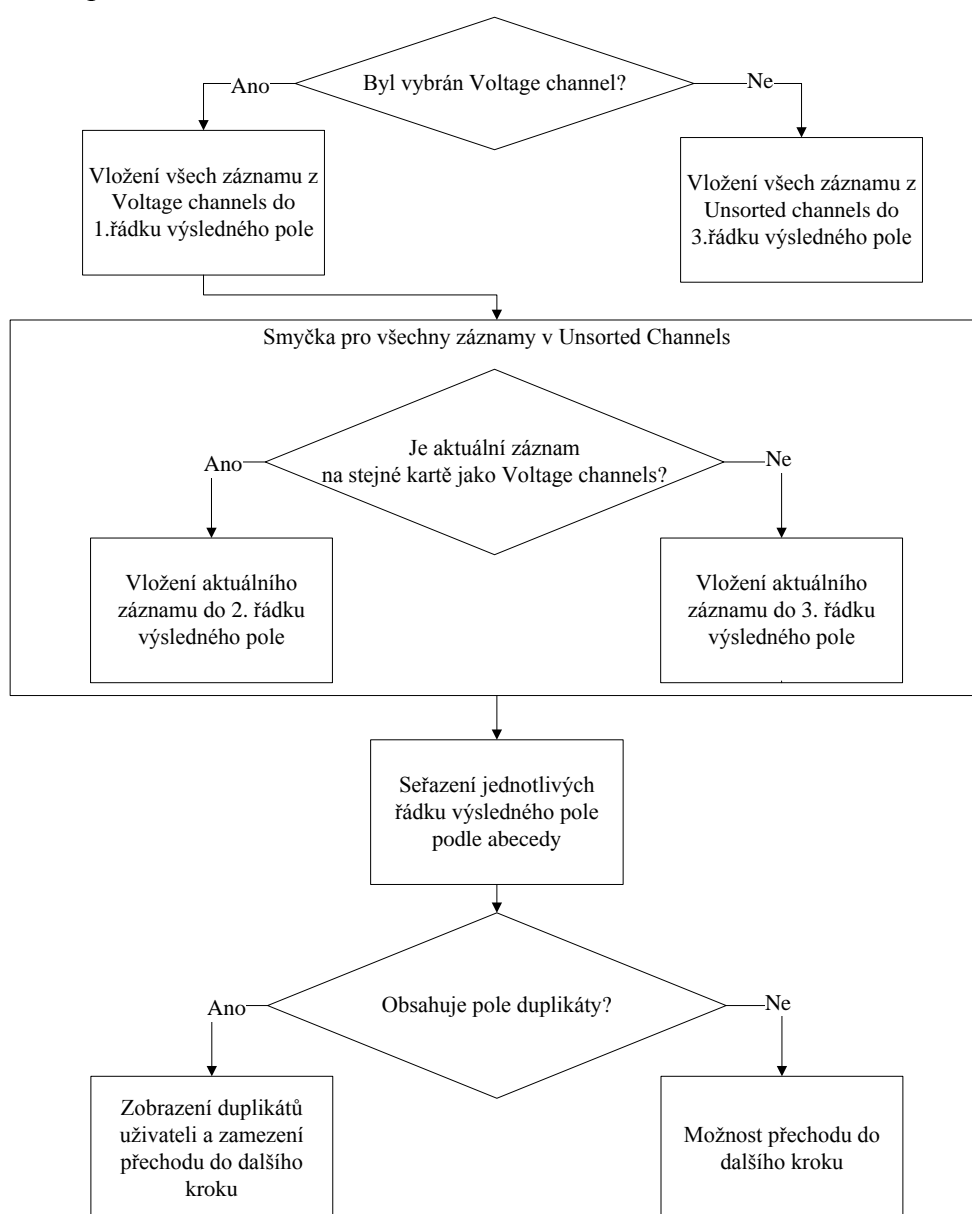
Tento krok obstarává veškeré nastavení a informace o připojených snímačích. V pravé části obrazovky se nachází nastavení pěti tříosých akcelerometrů, přičemž poslední dva mohou být přepnuty pouze na jednoosé. Přítomnost jednotlivých akcelerometrů lze jednoduše nastavit, čímž se zpřístupní další nastavení. Jedná se především o umístění senzoru, dále popis os a vybrané zapojení kanálů podle skutečnosti. Poslední položkou je citlivost dané osy, o které bude více psáno v části kalibrace snímačů.

Na pravé straně lze vidět dva kanály pro záznam rychlosti motoru a turbodmychadla s nastavením názvu kanálu, připojeném kanálu na měřicí kartě a také přepočtem napětí na otáčky podle rovnice (3) a (4). Oba kanály je možné vypnout a měřit tak pouze zrychlení v závislosti na čase.

Obr. 18. Obrazovka pro nastavení snímačů

Z hlediska kódu v tomto stavu dochází k rozdělení zadaných informací do několika polí pro další použití. Je to jednak informace o umístění senzoru, která se společně se zadaným názvem osy vkládá podle pořadí snímačů do pole *Headers Array*, které dále slouží pro popis grafů na obrazovce měření, pro vytvoření hlavičky ukládaných souborů a nakonec také pro správný název souborů vytvořených při analýze dat. Dále je to informace o připojení snímače k určitému analogovému vstupu měřicí karty, která se ukládá do pole *Unsorted Channels* v případě kanálu akcelerometrů a do *Voltage Channels* v případě kanálů pro měření rychlosti.

Pro větší variabilitu výsledného programu následně dochází k rozdělení těchto dvou polí vybraných kanálů na výše uvedené druhé měřicí karty pro pozdější potřebu nastavení jednotlivých kanálů v příslušných funkcích ve stavu měření dat s tím, že karta NI PXI-4496 je použita pouze pro měření zrychlení a karta NI PXI-4472 slouží jednak pro měření napětí pro snímání otáček a případně i pro měření vibrací (toto závisí čistě na uživateli a zvolených kanálech pro jednotlivé akcelerometry). Samotné rozdělení provádí funkce *Channels_into_cards.vi*, která se řídí diagramem na Obr. 19 a jednotlivé záznamy vkládá do příslušných řádku výsledného pole *All_channels_array* (napětíové vstupy do 1. řádku, případné vibrační vstupy na kartě NI PXI-4472 do 2. řádku a vibrační vstupy pro kartu NI PXI-4496 do 3. řádku). Toto pole je následně seřazeno podle abecedy (pro vzestupné pořadí jednotlivých kanálů na kartě) a zkontrolováno na obsah duplikátních kanálů, které se případně zobrazí po zmáčknutí tlačítka *Next* a zamezí přechodu do dalšího kroku, dokud uživatel nastavení neopraví.



Obr. 19. Vývojový diagram rozdělení měřicích kanálů na jednotlivé karty

3.2.3. Kalibrace snímače

Kalibrace snímače zrychlení probíhá pomocí zařízení **Kistler Type 8921**. Jedná se o přenosný zdroj vibrací, kde vnitřní elektronika zaručuje konstantní frekvenci kmitů (159,2 Hz) a uzavřená smyčka zajišťuje konstantní amplitudu nezávislou na hmotě přiloženého snímače (10 m/s² RMS pro snímače do 300g váhy). Tato kalibrace slouží pro přesné určení citlivosti jednotlivých os snímače v závislosti na aktuální teplotě a měřícím systému.



Obr. 20. Kalibrátor akcelerometrů Kistler Type 8921, převzato z [19]

Postup kalibrace je už poté jednoduchý, kalibrovaná osa se přiloží na spuštěný kalibrátor a podle naměřeného zrychlení se upraví hodnota citlivosti. Jelikož je u všech použitých senzorů udaná citlivost v jednotce mV/g, je potřeba nejprve udělat přepočet 10 m/s² na jednotku g podle rovnice (5). Následně se změřená RMS hodnota vibrací porovná s vypočtenou hodnotou vibrací kalibrátoru a jednoduchým vzorcem (6) se vypočte citlivost.

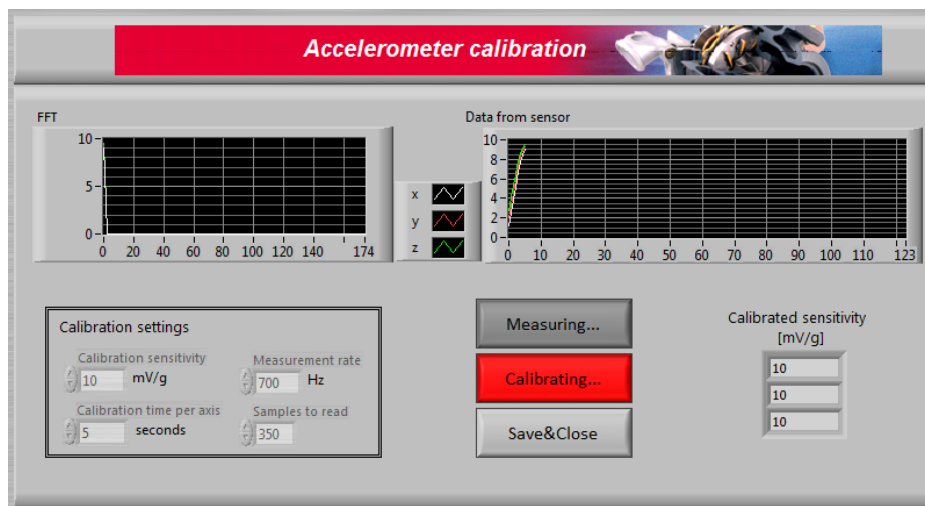
$$v_{generované} = \frac{10}{9,81} \quad (5)$$

$$S_{vypočtená} = \frac{v_{generované}}{v_{měřené}} \cdot S_{daná} \quad (6)$$

| | | |
|-----|------------------|--|
| Kde | $v_{generované}$ | vibrace generované kalibrátorem [g] |
| | $v_{měřené}$ | vibrace měřené akcelerometrem [g] |
| | $S_{daná}$ | senzitivita snímače daná výrobcem [mV/g] |
| | $S_{vypočtená}$ | vypočtená senzitivita snímače [mV/g]. |

Pro kalibraci slouží samostatná funkce *Calibration.vi*, která obsahuje i vlastní uživatelské rozhraní. Pro vstup této funkce slouží předem vybrané měřicí kanály, dále je zde nastavení kalibrace (zejména citlivost daná výrobcem a doba kalibrace na jednu osu). Po tuto dobu probíhá měření, kdy se následně všechny naměřené vzorky zprůměrují, a z výsledné hodnoty se vypočítá zkalibrovaná citlivost.

Tato funkce využívá tzv. Master/Slave techniky, kdy hlavní smyčka provádí kontinuální měření a vkládá data do lokální proměnné, zatímco druhá smyčka čte data z této proměnné pouze při stisknutí tlačítka *Calibrate*. Po obdržení určitého počtu dat pak provede vlastní výpočet kalibrované citlivosti a vyzve uživatele k přiložení další osy akcelerometru na kalibrátor.

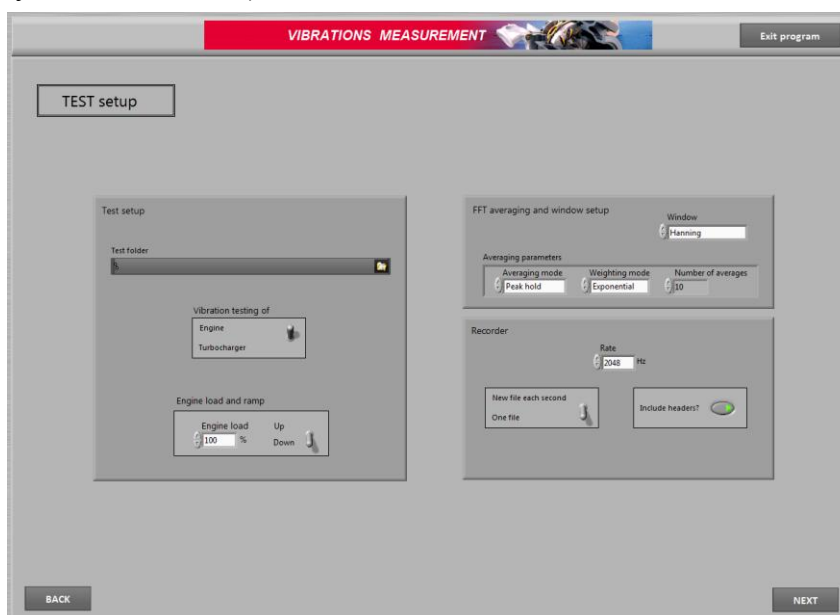


Obr. 21. Obrazovka programu při kalibraci

Celý proces kalibrace pro všechny osy akcelerometru je plně automatizovaný, takže uživatel jen postupuje podle pokynů na obrazovce a nakonec uloží zkalibrované hodnoty zpět do původního programu.

3.2.4. Nastavení testu

V této fázi uživatel nastavuje parametry samotného testu. Jedná se především o cestu ke složce, kam ukládat výsledky, dále zda se měří vibrace motoru nebo turbodmychadla. Toto nastaví jednak příslušnou frekvenci měření (2048 Hz pro vibrace motoru a 32 768 Hz pro vibrace turbodmychadla) a také zda ukládat data jednoho souboru po celou dobu měření, nebo zda periodicky vytvářet nový soubor každou sekundu (při měření vibrací turbodmychadla můžou mít uložená data až několik stovek MB, což při jednom souboru způsobuje problémy s následným otevřením a načtením dat pro výpočet analýzy). Dále zde uživatel nastaví parametry zatížení motoru - procenta jmenovitého krouticího momentu a také zda je nastavena rampa otáček nahoru nebo dolů (toto pak slouží k automatickému vytvoření příslušné složky a názvu souboru).



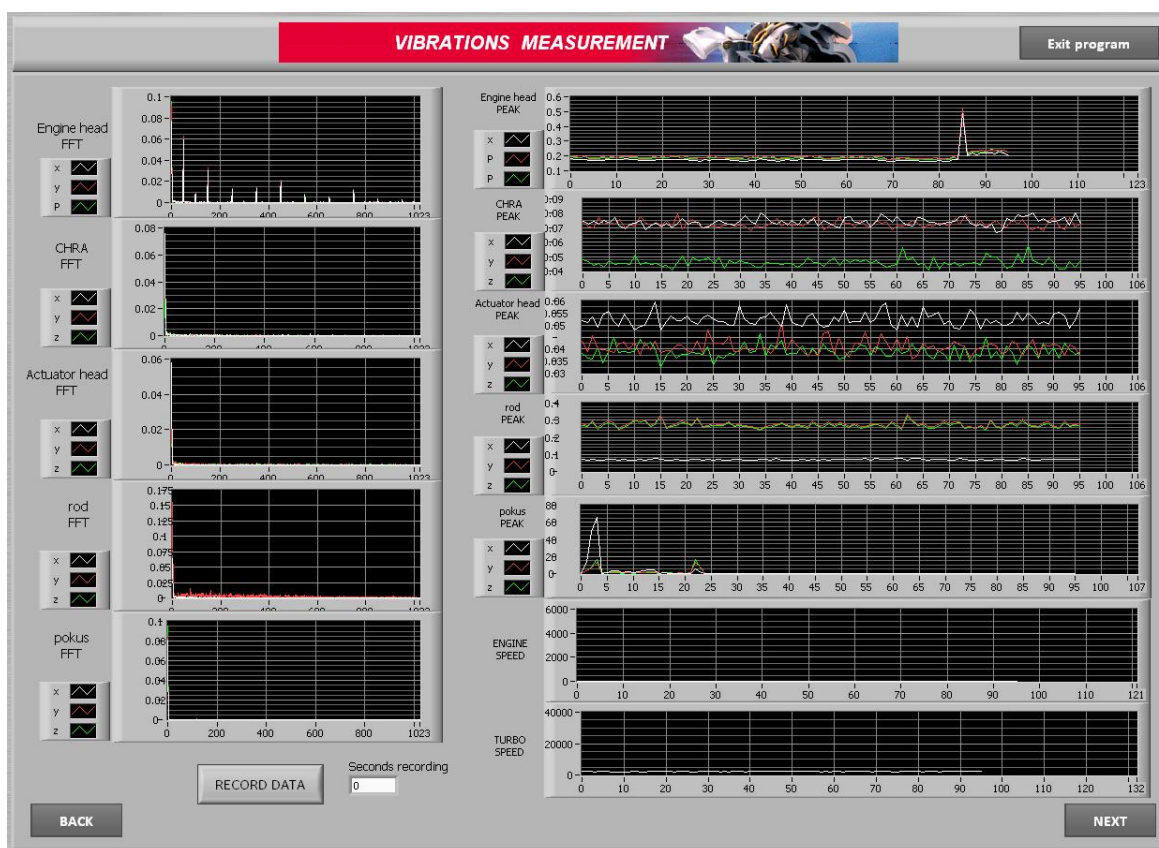
Obr. 22. Obrazovka programu nastavení testu

Na pravé straně obrazovky je pak nastavení průměrování a váhování oknem pro výpočet frekvenčního spektra při měření i následné analýze dat. Zde je možné nastavit jednak typ váhování (na výběr je např. okno. Hanningovo, Blackam-Harrisovo, Kaiser-Besselovo a mnoho dalších), dále typ průměrování (žádné, lineární, exponenciální nebo peak hold), a počet průměrování.

Nakonec je zde možno nalézt nastavení rekordéru, jednak měřicí a ukládací frekvence, která je přednastavena na dané měření (ale je možno ji i změnit pro potřeby nestandardního testování), dále přepínač ukládání do jednoho souboru nebo nového souboru každou sekundu a nakonec tlačítko, umožňující vkládání hlaviček s názvy a popisem jednotlivých kanálů do výsledných souborů. Tyto názvy uživatel nastavil na obrazovce „Nastavení připojených snímačů“ a slouží pro automatickou identifikaci jednotlivých kanálů pro další analýzy ve specializovaných programech.

3.2.5. Měření a zobrazení dat uživateli

Tato obrazovka obsahuje jednak průběh měřených špičkových hodnot zrychlení v čase a také aktuální frekvenční spektra pro všechny akcelerometry (názvy jednotlivých grafů odpovídají uživatelem nastaveným umístěním senzorů). Ve spodní části pak lze nalézt časový průběh otáček motoru a turbodmyhadla. Samotné měření dat ze snímačů se spouští automaticky, uživatel po validaci zobrazených signálů spustí ukládání do předem nastavených souborů kliknutím na tlačítko *Record data*. Dále probíhá samotné měření a ukládání dat (uživatel je informován, kolik sekund již probíhá test), po ukončení uživatel kliknutím na tlačítko *Recording* vypne ukládání dat.



Obr. 23. Obrazovka programu při měření

Z hlediska kódu v tomto kroku dochází nejprve k nastavení měřících karet podle předem specifikovaných parametrů, vymazání zobrazených dat z předchozího měření a dále k vytvoření tzv. časového pole. Toto pole obsahuje diskrétní hodnoty času měření pro první sekundu (dále už se při každé iteraci měřicí smyčky hodnota všech elementů pouze zvyšuje o jedničku) a tvoří vždy první sloupec výsledného souboru.

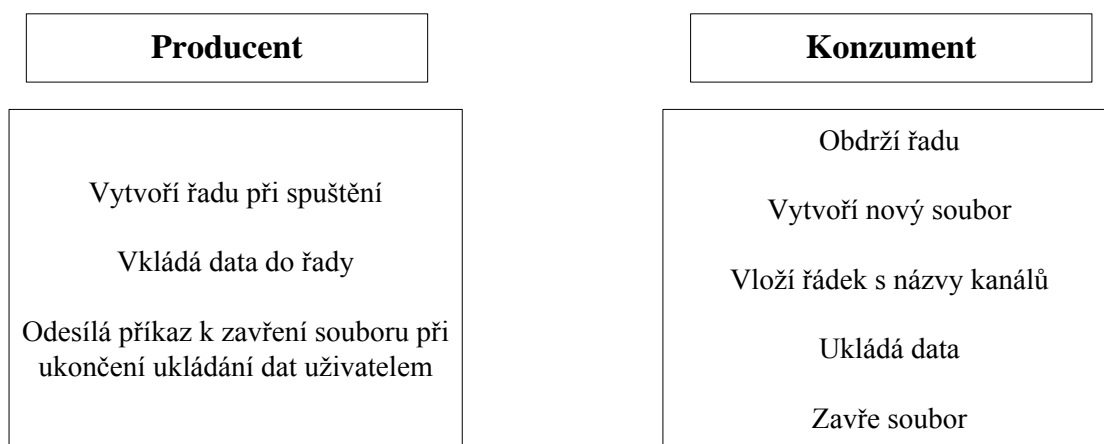
Po této „inicializační“ části již probíhá samotné měření hodnot, jejich zpracování (nalezení špičkové hodnoty, vytvoření frekvenčního spektra, přepočítání na otáčky) a zobrazení uživateli, případně k ukládání výsledků.

Toto probíhá v samostatné smyčce, která díky nastavení karty pracuje s frekvencí 1 Hz (karta čte hodnoty s nastavenou měřicí frekvencí, ukládá je do vlastní paměti a po dosažení určitého počtu je dále předává programu pro zpracování, tento počet je nastaven na stejnou hodnotu jako měřicí frekvence). Výstupem jsou 2 pole hodnot (pro každou kartu jedno), které v řádcích obsahují naměřené hodnoty odpovídající jednotlivým kanálům. Tyto data je dále potřeba správně přiřadit k jednotlivým akcelerometrům, provést výpočet frekvenčního spektra a špičkové hodnoty a zobrazit hodnoty uživateli. Toto obstarává funkce *Process_peak_FFT.vi*. Dále je potřeba přepočítat měřené hodnoty napětí na otáčky motoru a turbodmychadla, což zajišťují funkce *Engine_speed_process.vi* a *Turbo_speed_process.vi*. Nakonec je nezbytné všechny přepočítané hodnoty spojit do jednoho pole pro zápis do souboru.

3.2.6. Ukládání dat

Pro ukládání velkého množství dat do souboru bylo využito techniky producent-konzument, která zaručuje uložení všech dat při vhodném využití systémových prostředků. Základním rysem jsou 2 funkce v separátních asynchronních smyčkách a fronta, sloužící pro předávání dat mezi funkcemi. Jednotlivé smyčky LabVIEW automaticky provozuje na rozdílných procesorových jádrech, čímž zajišťuje paralelizaci programu.

Jako producenta lze považovat funkci *Datalogger Data Sender.vi*, která je umístěna v hlavní měřicí smyčce a periodicky přidává naměřená data na začátek fronty. Jako konzument pak slouží funkce *Datalogger Engine.vi* umístěna v separátní smyčce, která odebírá data z konce fronty a zajišťuje celou režii tvorby souborů. Jednotlivé role těchto funkcí lze vidět na Obr. 24.



Obr. 24. Jednotlivé funkce producenta a konzumenta

Při uživatelem zvolené variantě ukládání do nového souboru pro každou vteřinu měření je použita funkce *Datalogger Engine-file_s.vi*, která zajišťuje periodické vytváření nového souboru se jménem obsahujícím pořadové číslo.

Jako formát ukládaných souborů byl zvolen textový soubor s tabulátorově oddělenými kanály (Obr. 25.). Tento formát je standardem pro mnoho měřících zařízení, neboť zachovává přehlednost a navíc umožňuje otevření a manipulaci v dalších programech pro analýzu dat.

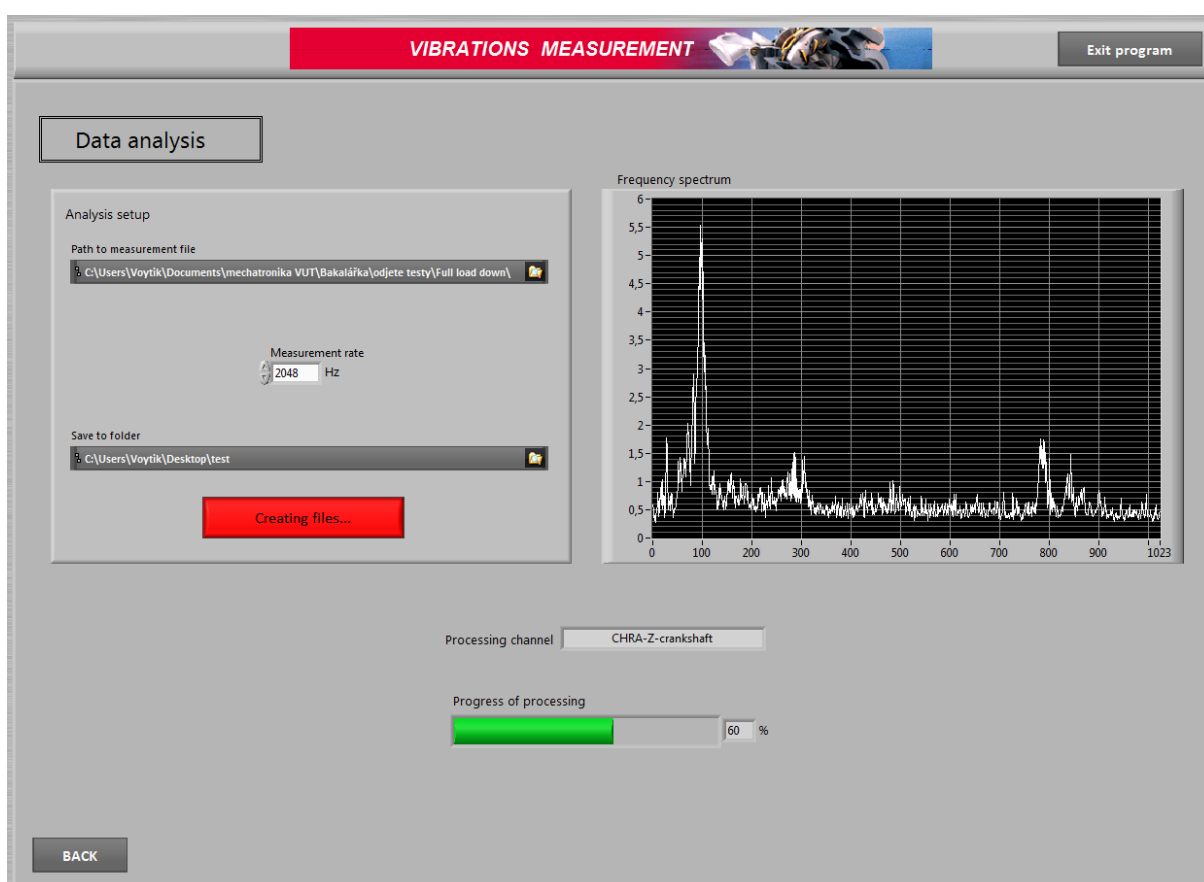
| Time | Engine speed | Engine head-X-crankshaft | Engine head-Y-transversal | Engine head-Z-up | CHRA-X-down |
|----------|--------------|--------------------------|---------------------------|------------------|-------------|
| 0.000000 | 757.347942 | -0.022565 | -0.030777 | -0.045898 | -0.024868 |
| 0.000488 | 757.896534 | -0.025101 | -0.035424 | -0.044321 | -0.033834 |
| 0.000977 | 758.403195 | -0.024621 | -0.034026 | -0.051190 | -0.028474 |
| 0.001465 | 758.904684 | -0.030489 | -0.035548 | -0.052341 | -0.030297 |
| 0.001953 | 759.417661 | -0.023141 | -0.035082 | -0.052821 | -0.029077 |
| 0.002441 | 759.867450 | -0.021263 | -0.032216 | -0.050381 | -0.034862 |
| 0.002930 | 760.278176 | -0.022373 | -0.037220 | -0.041580 | -0.033162 |
| 0.003418 | 760.612505 | -0.025444 | -0.034026 | -0.046433 | -0.032970 |
| 0.003906 | 760.898575 | -0.029406 | -0.033546 | -0.044363 | -0.038810 |
| 0.004395 | 761.128927 | -0.029255 | -0.033190 | -0.047365 | -0.033656 |
| 0.004883 | 761.244966 | -0.033656 | -0.035342 | -0.043115 | -0.037344 |
| 0.005371 | 761.323089 | -0.034204 | -0.039866 | -0.038879 | -0.037919 |
| 0.005859 | 761.323663 | -0.035260 | -0.03784 | -0.042416 | -0.02667 |
| 0.006348 | 761.261051 | -0.030695 | -0.038660 | -0.036302 | -0.038989 |
| 0.006836 | 761.161671 | -0.027432 | -0.034190 | -0.045898 | -0.028899 |
| 0.007324 | 760.999678 | -0.030146 | -0.036754 | -0.042224 | -0.039372 |
| 0.007812 | 760.81962 | -0.019549 | -0.035616 | -0.049599 | -0.034108 |
| 0.008301 | 760.532081 | -0.028981 | -0.034643 | -0.044650 | -0.028858 |
| 0.008789 | 760.255775 | -0.034533 | -0.038481 | -0.045487 | -0.033916 |
| 0.009277 | 759.939254 | -0.031325 | -0.035986 | -0.049312 | -0.036082 |
| 0.009766 | 759.583673 | -0.033752 | -0.037659 | -0.045994 | -0.033231 |
| 0.010254 | 759.207413 | -0.025184 | -0.034245 | -0.051094 | -0.030475 |
| 0.010742 | 758.857003 | -0.025677 | -0.038454 | -0.039030 | -0.032422 |
| 0.011230 | 758.430193 | -0.027733 | -0.035369 | -0.041840 | -0.032573 |
| 0.011719 | 758.024634 | -0.026061 | -0.034081 | -0.039510 | -0.029886 |
| 0.012207 | 757.599546 | -0.030900 | -0.034492 | -0.046830 | -0.038687 |
| 0.012695 | 757.166415 | -0.023141 | -0.032710 | -0.047721 | -0.031010 |
| 0.013184 | 756.795328 | -0.023621 | -0.035493 | -0.042238 | -0.031997 |
| 0.013672 | 756.409873 | -0.028679 | -0.037097 | -0.044088 | -0.027555 |
| 0.014160 | 756.065209 | -0.023264 | -0.035273 | -0.041991 | -0.034972 |
| 0.014648 | 755.732607 | -0.021605 | -0.034341 | -0.040743 | -0.033025 |
| 0.015137 | 755.546487 | -0.024800 | -0.032943 | -0.044911 | -0.036110 |
| 0.015625 | 755.426429 | -0.019206 | -0.029461 | -0.049558 | -0.036932 |
| 0.016113 | 755.374725 | -0.020193 | -0.033998 | -0.049065 | -0.037398 |
| 0.016602 | 755.431596 | -0.019892 | -0.029899 | -0.047296 | -0.033354 |
| 0.017090 | 755.564868 | -0.025636 | -0.036315 | -0.041593 | -0.029050 |
| 0.017578 | 755.796368 | -0.022264 | -0.032737 | -0.039194 | -0.035068 |
| 0.018066 | 756.096227 | -0.022963 | -0.031147 | -0.036055 | -0.032189 |
| 0.018555 | 756.473639 | -0.032449 | -0.032463 | -0.034835 | -0.030311 |
| 0.019043 | 756.887809 | -0.029406 | -0.032929 | -0.035726 | -0.025979 |
| 0.019531 | 757.328982 | -0.029625 | -0.035109 | -0.039647 | -0.031558 |
| 0.020020 | 757.836792 | -0.035863 | -0.032395 | -0.033574 | -0.027583 |
| 0.020508 | 758.312431 | -0.034190 | -0.036178 | -0.032120 | -0.030228 |
| 0.020996 | 758.767388 | -0.034341 | -0.035520 | -0.043869 | -0.020372 |
| 0.021484 | 759.247625 | -0.024416 | -0.038221 | -0.038440 | -0.024142 |
| 0.021973 | 759.675584 | -0.028693 | -0.034410 | -0.041977 | -0.029392 |
| 0.022461 | 760.048973 | -0.032586 | -0.033916 | -0.039208 | -0.020193 |
| | | | | | -0.008637 |
| | | | | | -0.014066 |

Obr. 25. Výsledný textový soubor s naměřenými hodnotami

4. ANALÝZA NAMĚŘENÝCH DAT

4.1. Realizace v programu

Analýza dat je posledním krokem programu s odpovídající obrazovkou (Obr. 26.). Zde je zapotřebí vybrat uložený soubor s naměřenými daty (automaticky se načte poslední měření), dále nastavit frekvenci měření (opět je automaticky vložena poslední použitá) a nakonec specifikovat složku, kam se vytvořené soubory uloží. Po stisknutí tlačítka *Create files* započne výpočet a ukládání souborů. O průběhu analýzy je uživatel informován jednak tzv. status barem, který ukazuje procentuální průběh tvorby souborů a také názvem aktuálně zpracovávaného kanálu (názvy se načítají z nastavení jednotlivých kanálů ve stavu „Nastavení připojených snímačů“).

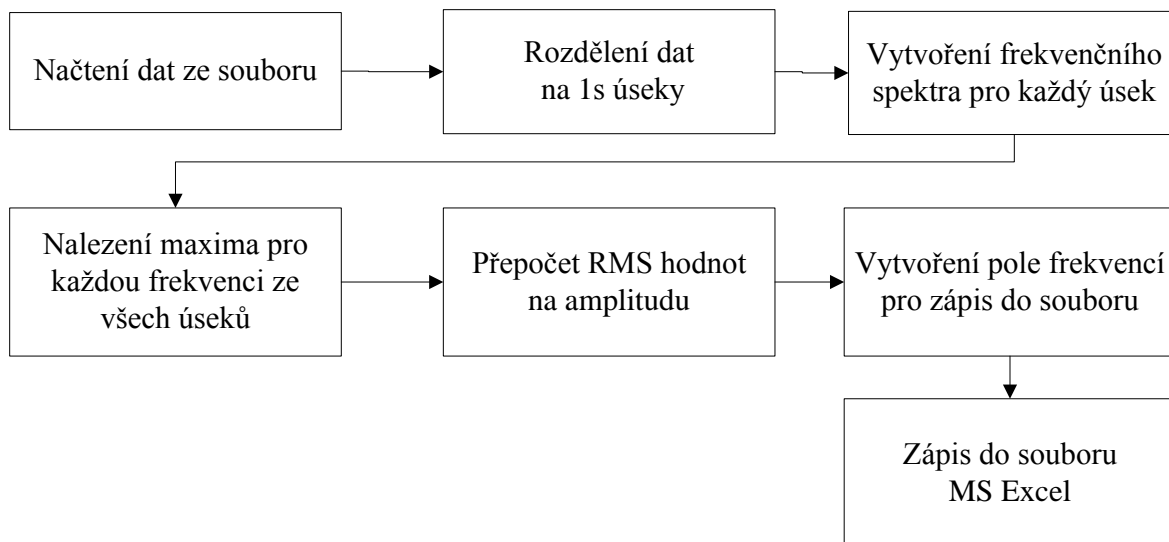


Obr. 26. Obrazovka pro analýzu naměřených dat

4.2. Výpočet frekvenčního spektra

Programová realizace tvorby frekvenčních spekter je popsána na Obr. 27. Nejprve jsou načtena data z textového souboru, dále jsou odstraněny sloupce s časovou hodnotou a otáčkami motoru a turbodmychadla (pro tuto analýzu nejsou podstatné). Následně dojde k rozdělení na jednosekundové úseky, aplikaci zvoleného okna a výpočet vlastního frekvenčního spektra pro daný úsek. Pro jednotlivé hodnoty frekvence se nalezne maximum všech úseků, převede se na amplitudu (funkce FFT v LabVIEW ve výchozím stavu vrací RMS hodnoty) a tato řada se

vloží do pole pro zápis společně s číselnými hodnotami frekvence. Nakonec se výsledné pole zapíše do souboru MS Excel a uloží pod uživatelem specifikovaným názvem kanálu.

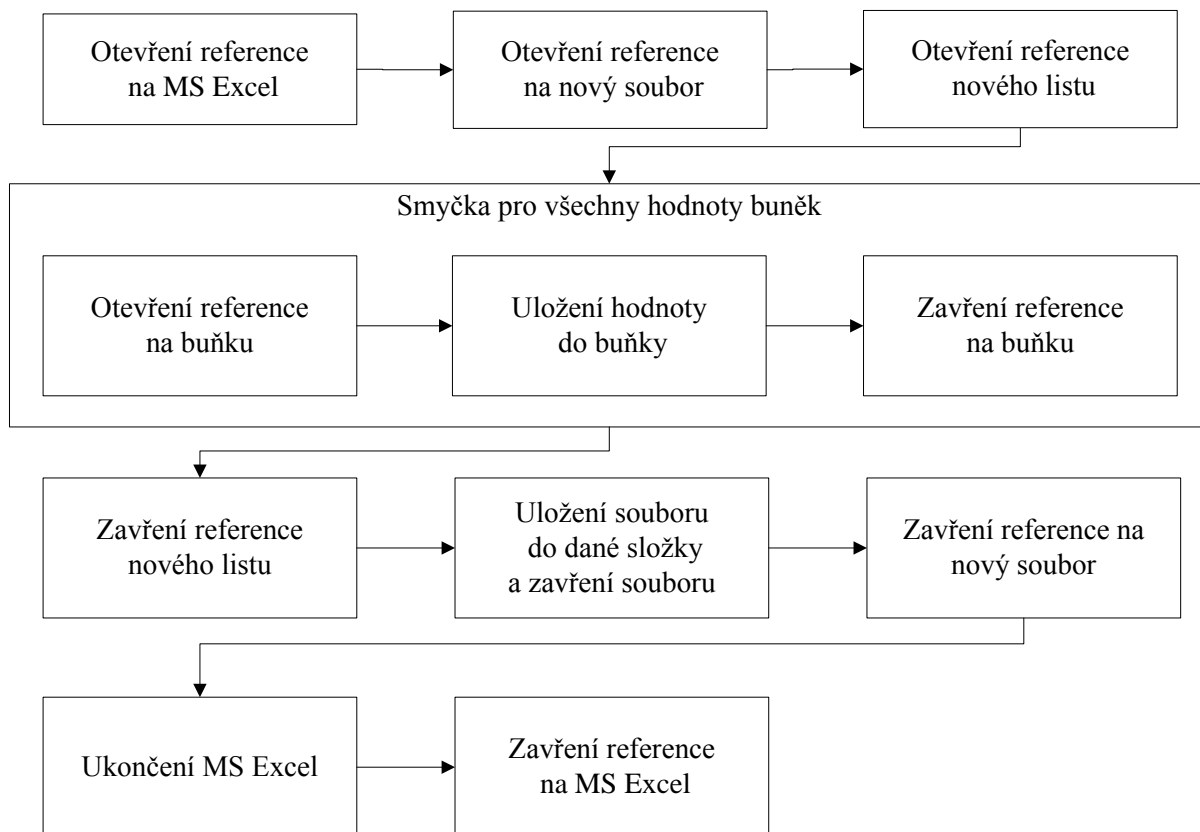


Obr. 27. Průběh tvorby frekvenčního spektra pro jeden kanál

4.3. Uložení výsledků do MS Excel

Jelikož LabVIEW neobsahuje ve své základní verzi funkce pro přímou komunikaci s MS Excelem (je možno dokoupit tzv. Report Generation Toolkit), je mezi programy potřeba komunikovat pomocí ActiveX Automatizace. Tato technika pracuje na principu Server/Klient, kde MS Excel (server) nabízí své objekty ke kontrole klientovi (LabVIEW). Objekty představují uživatelské rozhraní (např. sešit) a mohou mít metody (funkce, které provádějí určitou akci, např. uložení) a vlastnosti (např. velikost), které je možno ovládat přímo z prostředí LabVIEW.

Samotná komunikace má následující kroky: otevření reference na zvolený program, vyvolání metod a nastavení/obdržení vlastností jednotlivých objektů a poté zavření reference. Nevýhodou je, že jednotlivé reference je potřeba zavírat ve stejném pořadí, jako byly otevřené, což přináší velkou složitost a nepřehlednost kódu. Naštěstí LabVIEW obsahuje dobrý příklad uložení tabulky do MS Excel (Write Table To XL.vi), který obsahuje všechny důležité funkce. Popis jednotlivých kroků při ukládání je uveden na Obr. 28.



Obr. 28. Průběh ukládání frekvenčního spektra do souboru MS Excel

5. ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo vytvořit funkční program v prostředí LabVIEW pro laboratorní testy turbodmychadel. Nejdříve bylo zapotřebí provést rešerši na téma funkce, konstrukce a také vzniku vibrací na turbodmychadle. Následně byl popsán princip a parametry použitých akcelerometrů včetně vlivu připevnění k měřenému vzorku na použitelný frekvenční rozsah. Dále byla vybrána vhodná hardwarová platforma včetně měřících karet s ohledem na požadavky měření, přičemž byla brána v úvahu i jednoduchá rozšiřitelnost a univerzálnost systému.

Hlavní částí je popis tvorby programu, který umožňuje uživateli krok po kroku provedení celého procesu tohoto testu. Program obsahuje přehledné nastavení jednotlivých akcelerometrů, kde nabízí možnost výběru tříosý/jednoosý, dále umístění snímače pro kontrolu správného zapojení i následnou tvorbu názvů kanálů pro ukládání dat, volbu fyzického vstupu podle připojených karet a nakonec citlivost snímače danou výrobcem pro každou osu. Tuto citlivost je možné jednoduše zkalibrovat přímo v programu podle aktuálního zapojení přiložením osy akcelerometru na kalibrátor. Dále je možno nastavit měření otáček motoru a turbodmychadla z nadřazených systémů na specifických kanálech.

V dalším kroku programu již probíhá nastavení testu, tedy například cesty k ukládání souboru s naměřenými daty, nastavení frekvence ukládání, nebo průměrování a váhování oknem při výpočtu aktuálního frekvenčního spektra.

Následující krok představuje měření a ukládání dat. Uživatel je informován o aktuální špičkové hodnotě a frekvenčním spektru na každé ose akcelerometru, přičemž po ověření správného připevnění a nastavení snímačů spouští měření. Data se ukládají do předem nastaveného souboru.

Po změření všech režimů přichází na řadu poslední krok, analýza naměřených dat. Zde dochází k výpočtu frekvenčního spektra pro každou osu akcelerometru s důrazem na špičkové hodnoty jednotlivých složek spektra. Tyto hodnoty jsou poté uloženy v programu MS Excel do souboru s příslušnými názvy.

Tento program umožňuje jak standardizovaný test podle přednastavených parametrů, kdy v podstatě stačí jen připojit akcelerometry a měřit, tak i nestandardní měření pro specifické testy podle požadavků zákazníků. Díky tomu lze použít i pro jiné účely a na jiných měřících systémech, což zvyšuje jeho hodnotu.

V rámci dalšího rozvoje programu lze zmínit například možnost přidání automatického spouštění ukládání podle jednoho měřícího kanálu a TTL logiky (tento výstup by bylo možné realizovat ze systému ovládání motoru), čímž by se celý test ještě více zautomatizoval. Dále je zde možnost přidat další analýzy naměřených dat podle specifikací zákazníků, např. vyhodnocení harmonických komponent frekvenčního spektra a jejich průběh v závislosti na otáčkách motoru.

6. POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Honeywell TurboTechnologies - Turbos then and now - 100 Years of Turbo [online]. [cit. 2012-04-05]. Dostupné z: <http://www.honeywell.com/sites/ts/tt/100Years_Turbo3_C83869114-FF16-C7FE-13F7-7CD478B60F02_H19E431BC-4FA0-863A-10AA-9F8A9E3EA73F.htm>.
- [2] Výhody a nevýhody přeplňovaných motorů [online]. [cit. 2012-04-05]. Dostupné z: <<http://www.alfisti.cz/index.php?link=cuore-technikamotory-turbo-atmo>>.
- [3] Turbo Fundamentals [online]. [cit. 2012-04-05]. Dostupné z: <<http://turbo.honeywell.com/turbo-basics/turbo-fundamentals/>>.
- [4] Turbo advantage [online]. [cit. 2012-04-05]. Dostupné z: <<http://www.honeywell.com/sites/servlet/com.merx.npoint.servlets.DocumentServlet?docid=D0C6939E6-E33A-474A-5846-168A42869844&userID=npointadmin>>.
- [5] Booster Online - Honeywell Ball Bearing Turbo Debuts in Premium Diesel Cars [online]. [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: <<http://turbo.honeywell.com/whats-new-in-turbo/story/honeywell-ball-bearing-turbo-debuts-in-premium-diesel-cars/>>.
- [6] AudiWorld: About the N75 Wastegate Bypass Regulator Valve [online]. [cit. 2012-06-05]. Dostupné z: <<http://forums.audiworld.com/showthread.php?t=1476692>>.
- [7] Wastegate Actuators [online]. [cit. 2012-06-05]. Dostupné z: <<http://www.motorsport-developments.co.uk/actuators.html>>.
- [8] JEDELSKÝ, J. Vyhodnocování dílčích zdrojů hluku a vibrací spalovacího motoru. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2001, Disertační práce
- [9] MATZAN Eugene, Detecting Premature Bearing Failure. *Machinery Lubrication magazine* [online]. 2007. Dostupné z: <<http://www.machinerylubrication.com/Read/1041/detecting-bearing-failure>>.
- [10] GUNTER, Edgar J., CHEN, Wen Jeng. Dynamic analysis of turbocharger in floating bushing bearings. In ISCORMA-3, Cleveland, Ohio, 19-23 September 2005. [online]. 2005 [cit. 2012-06-05]. Dostupné z: <http://www.rodyn-inc.com/ISCORMA3_Gunter%26Chen_TurbochargerVer2.pdf>.
- [11] VOJÁČEK, A. Principy akcelerometrů – Piezoelektrické. *Automatizace.hw.cz* [online] 2007, Leden. [cit. 2012-06-05] Dostupné z: <<http://automatizace.hw.cz/clanek/2007011401>>.

- [12] KISTLER, Accelerometers [online]. [cit. 2012-06-05] Dostupné z: <www.kistler.com/mediaaccess/en-us/900-380a-08.07.pdf>.
- [13] PCB, Product manual HT356B21 [online]. [cit. 2012-06-05] Dostupné z: <http://www.pcb.com/contentstore/docs/PCB_Corporate/Vibration/products/Manuals/HT356B21.pdf>.
- [14] PCB, Product manual M353B16 [online]. [cit. 2012-06-05] Dostupné z: <http://www.pcb.com/contentstore/docs/PCB_Corporate/Vibration/products/Manuals/M353B16.pdf>.
- [15] National Instruments [online]. [cit. 2012-06-05] Dostupné z: <<http://www.ni.com>>.
- [16] HOREVAJ, M, Analyzátoři FFT [online]. [cit. 2012-06-05] Dostupné z: <http://horevaj.com/horevaj/K4_files/K4_84.pdf>.
- [17] LDS, Understanding FFT Windows [online]. [cit. 2012-06-05] Dostupné z: <http://www.ee.iitm.ac.in/~nitin/_media/ee462/fftwindows.pdf>.
- [18] TŮMA, Jiří; Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT [online]. [cit. 2012-06-05] Dostupné z: <<http://homel.vsb.cz/~tum52/publications/Tuma-kniha1.pdf>>.
- [19] Inter Technology, Kistler Type 8921 Accelerometer Calibrator [online]. [cit. 2012-06-05] Dostupné z: <http://www.intertechnology.com/Kistler/ACC_Model_8921.htm>.

7. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

| | |
|----------------------|--|
| VNT | Variable Nozzle Turbine |
| DC | Stejnoseměrný proud (direct current) |
| f | frekvence |
| n | otáčky [ot/min] |
| n_{motoru} | otáčky motoru [ot/min] |
| $n_{turbodmychadla}$ | otáčky turbodmychadla [ot/min] |
| RMS | efektivní hodnota |
| NI | National Instruments |
| PXI | platforma založena na PC pro vysokorychlostní měření |
| FPGA | programovatelné hradlové pole |
| U | napětí [V] |
| $v_{generované}$ | vibrace generované kalibrátorem [g] |
| $v_{měřené}$ | vibrace měřené akcelerometrem [g] |
| $S_{daná}$ | senzitivita snímače daná výrobcem [mV/g] |
| $S_{vypočtená}$ | vypočtená senzitivita snímače [mV/g] |
| MB | megabyte |
| FFT | Rychlá Fourierova transformace |
| X_k | složky DFT spektra signálu |
| x_n | stupní diskretní signál |
| N | počet vzorků |
| Y_i | nový průměr |
| Y_{i-1} | předchozí průměr |
| X_i | nově vypočítané spektrum |
| p | počet průměrování |
| MS | Microsoft |
| TTL | Transistor to transistor logic |

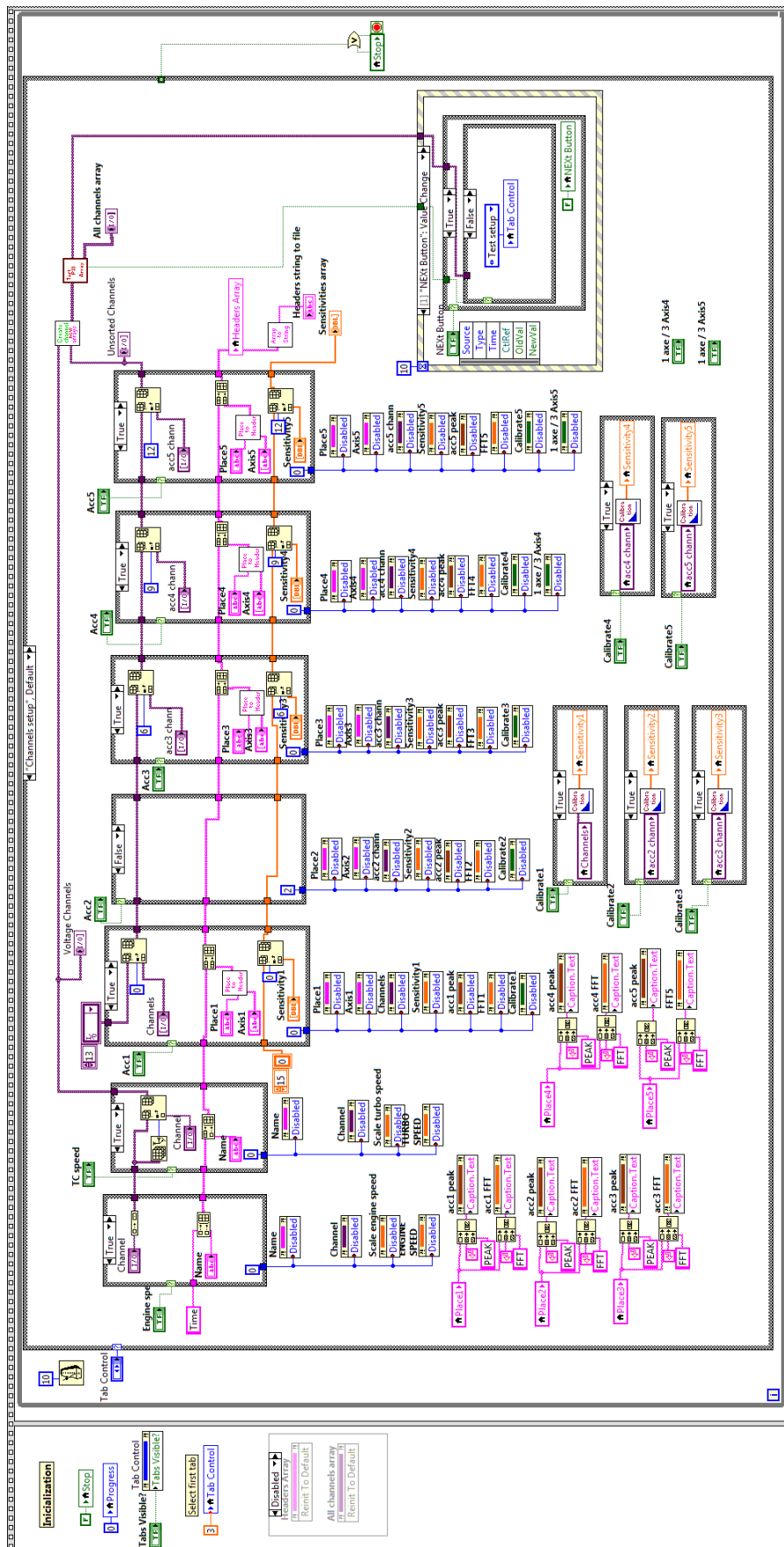
8. SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1: Grafický kód inicializace a nastavení snímačů
- Příloha 2: Grafický kód kalibrace snímačů
- Příloha 3: Grafický kód měřicího a ukládacího stavu
- Příloha 4: Grafický kód analýzy dat

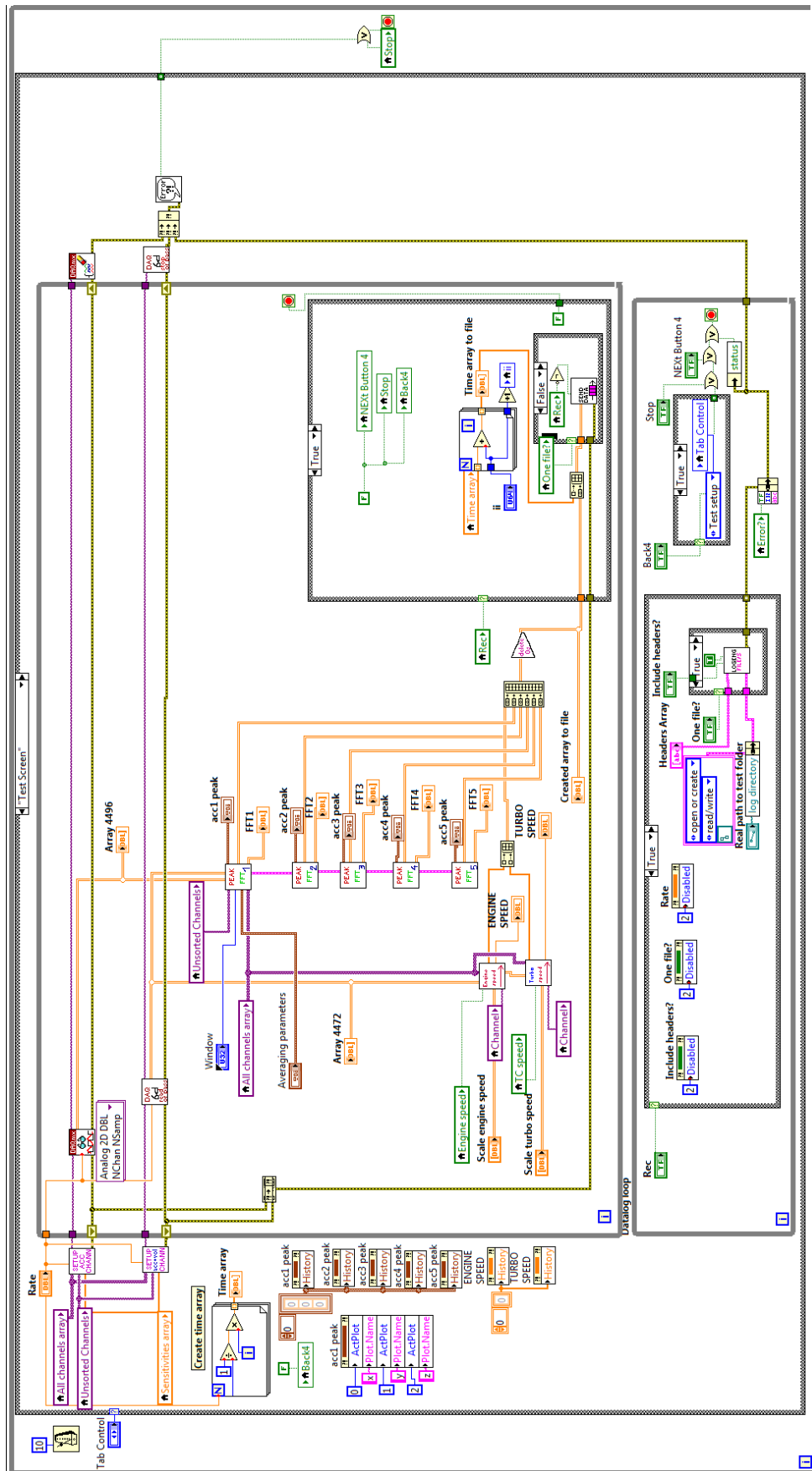
9. SAMOSTATNÉ PŘÍLOHY

Příloha 5: CD-ROM s bakalářskou prací a vytvořeným programem

Příloha 1 Grafický kód inicializace a nastavení snímačů



Příloha 3 Grafický kód měřicího a ukládacího stavu



Příloha 4 Grafický kód analýzy dat

